

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

GRAVITATION AND THE UNIVERSE

by R. H. DICKE

AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY

PHILADELPHIA, 1970

ГРАВИТАЦИЯ И ВСЕЛЕННАЯ

Р. ДИККЕ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
И ПРЕДИСЛОВИЕ

Н. В. МИЦКЕВИЧА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА
1972

Книга представляет собой курс из трех лекций, прочитанных известным американским теоретиком и экспериментатором Р. Дикке. Первая лекция посвящена опыту Этвеша (эксперименту по проверке эквивалентности тяготеющей и гравитационной масс), повторенному автором с намного большей точностью. Вторая лекция посвящена эксперименту по обнаружению и измерению сплюснутости Солнца и его влиянию на движение перигелиев планет Солнечной системы. В третьей лекции рассматриваются проблемы релятивистской космологии в связи с эволюцией Вселенной из начального горячего состояния.

Написанная признанным и оригинальным исследователем, книга будет с интересом прочитана как специалистами в области астрономии, физики, космологии и геофизики, так и множеством других читателей: студентами, аспирантами, преподавателями, философами и всеми, кто интересуется успехами современной науки.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

Гений Ньютона триста лет назад открыл человечеству законы тяготения. Физика как точная наука делала в те времена свои первые, далеко не уверенные шаги. В математике Ньютону пришлось открывать не просто новые главы, но целые *исчисления*, чтобы довести свои идеи до количественного воплощения. И вот уже триста лет мы во всех практических приложениях опираемся на ньютоновскую теорию, не добавив к ней ничего, кроме методов расчета (по большей части приближенных). Все исследования — от баллистических задач полета снарядов у поверхности Земли до определения орбит искусственных спутников, естественных планет и их лун, переплетенных взаимными гравитационными возмущениями, и, наконец, до невообразимо далеких и чудовищно массивных звездных систем — все прикладные исследования опираются на наследство, оставленное нам Исааком Ньютоном.

Более 50 лет назад Альберт Эйнштейн все же сделал следующий шаг. Это был шаг поистине семимильный, подстать перевороту, совершенному его предшественником. Однако долгое время казалось, что все новые выводы, следующие из общей теории относительности Эйнштейна, сводятся к тончайшим эффектам, не выходящим за рамки чисто академического интереса, или лишь обосновывают с современных позиций старую ньютоновскую теорию. Этих эффектов три, и о них не умалчивает ни одна книга по общей теории относительности (вы встретите их обсуждение и в этой книге Дикке), но никакой простак еще не стал основывать расчеты запусков ракет в космос на эйнштейновских уравнениях. Значит ли это, что рафинированность теории доведена до полного отрыва от жизни?

Серьезный физик не может согласиться с подобным предположением. Прежде всего он скажет в ответ, что физика (и наука вообще) едина, что сдвиг даже малейшего кирпичика в ее основании сотрясает все здание. Это сущая правда, но есть люди, которых этим не убедишь. Поищем других доводов.

В 1922 г. в релятивистской космологии (новой науке, незадолго до этого родившейся на базе общей теории относительности) произошло важное событие. Советский ученый А. А. Фридман предсказал нестационарность Вселен-

ной, причем одним из вариантов этой нестационарности является расширение. Такое расширение Вселенной по характерному закону, предсказанному Фридманом, было установлено через семь лет на наблюдательной основе Э. Хабблом. Шли годы, накапливались новые эмпирические факты, приобретался опыт теоретических исследований, и постепенно становилось все яснее, что теория Эйнштейна настойчиво требует пересмотра взгляда на Вселенную как целое. Оказалось, что Вселенную можно рассматривать как замкнутую, когда искривление пространства-времени делает ее конечной. Тогда в рамках современного уровня науки с почти полной неизбежностью следует, что развитие Вселенной идет от одной всеобщей катастрофы к другой (уравнения предсказывают сингулярности). На нашем этапе своего развития мир расширяется; кстати, именно поэтому в нем можно жить. Расширяясь, он «остывает» подобно тому, как охлаждается газ при адиабатическом расширении. Излучение от далеких объектов, странствуя в расширяющейся Вселенной, доходит до нас в тем более «остывшем» состоянии, чем дальше его источник от нас. Поэтому энергия излучения падает быстрее, чем этого требовал бы закон обратной пропорциональности квадрату расстояния, а если бы этого не случилось, мы были бы как в раскаленной печи, и повсюду царили бы звездные температуры.

Может быть, такое понимание существующей ситуации практически бесполезно, так как предотвратить, по-видимому, ожидающее Вселенную в исторически бесконечно далеком будущем сжатие у нас нет никакой мало-мальски разумной надежды. Но такое понимание смогла нам дать лишь теория тяготения Эйнштейна.

Уже то, что мы знали в рамках теории тяготения Ньютона, говорило об удивительных свойствах гравитации. Чрезвычайно слабое взаимодействие оказалось самым могучим в космических масштабах, где электромагнетизм уступает ему первенство, так как противоположные заряды встречаются в равных пропорциях и нейтрализуют друг друга, тогда как отрицательных масс мы никогда не встречали. В общей теории относительности гравитация, оставаясь по-прежнему слабой для элементарных частиц, вершит судьбами мира в большом. Она повинна в расширении

и сжатии Вселенной, в явлении гравитационного коллапса и в выделении грандиозных количеств энергии. Но все это происходит в астрономических и космологических масштабах, мы же живем на маленькой, затерянной в галактической провинции планетке и не способны создать в своих тесных лабораториях даже отголоска космических катастроф! Какое нам до всего этого может быть дело?

Такие мысли, на первый взгляд вполне естественные, в действительности лишь дань нашей узости, нашей гео- и антропоцентричности. Только адекватное понимание законов, действующих во Вселенной, овладение конкретным и эвристическим содержанием естественных наук может придать нам верное чувство нашего места в мире, в цепи эволюции, осознание своих «прав» и возможностей во Вселенной.

Потомки сгустков органических веществ, возникших на нашей планете по общим для всей природы законам, мы вместе с тем — дети этой Вселенной, дети ее расширения. Мы питаемся потоком энергии Солнца — нашей индивидуальной звезды. Мы гадаем, не взорвется ли наше Солнце, превратившись в «новую звезду»? Мы рвемся в Большой Мир, рвемся иногда «самолично» (обитаемые станции, Луна), иногда протягиваем руки-автоматы, чаще же всего ловим бесчисленные сигналы, которыми нас обстреливает Вселенная.

Мы перестаем измерять расстояния на шаги и локти, все чувствительнее наши приборы, все тоньше эффекты, подлежащие проверке. Но от этих эффектов, накапливающихся в Большом Мире вокруг нас, может зависеть слишком многое, и нам нужно знать, знать, знать! Этот категорический императив требует выхода из тесноты земных лабораторий. Нашими приборами становятся поочередно Солнце и другие звезды, Галактика, мир множества галактик — вся видимая Вселенная. Но здесь слово должно быть предоставлено автору этой книги, который вне конкуренции при обсуждении этих проблем.

Профессор Р. Дикке — удивительно разносторонний человек. Он давно и широко известен как блестящий экспериментатор, виртуозно владеющий техникой. Но он и теоретик, пользующийся заслуженным уважением коллег. Теоретик не простой, а бунтарь, скептик и открыватель.

Автор этой книги умеет критически оценить не только чужие, но и свои собственные достижения. Открытия, сделанные проф. Дикке в фундаментальной физике, явились важным, признанным этапом в развитии науки, и читатель может радоваться встрече с ним на страницах этой книги.

Уже много лет проф. Дикке разрабатывает скалярно-тензорную теорию тяготения, конкурирующую с общей теорией относительности Эйнштейна. Чтобы познакомиться с ней детальнее, читатель может обратиться к статьям Р. Дикке в сборнике «Гравитация и относительность» (изд-во «Мир», 1965). Теория Дикке внутренне непротиворечива и обладает определенной степенью простоты, как это должно быть у всякой не слишком заумной теории. Однако обе теории тяготения — Эйнштейна и Дикке — приводят к несколько различным предсказаниям при описании ряда физических процессов. Чтобы сделать выбор, мы должны располагать очень тонкими опытными данными. Их-то как раз и нет (или они неоднозначны). Ценный обзор ситуации дает сам проф. Дикке в этой книге, и читатель сможет быстро войти в курс дела. Кроме того, автор коротко и ясно обрисовывает много других проблем теории гравитации и космологии, так что его книга полезна и как введение при их изучении.

Мне кажется, что общая теория относительности стройнее и экономнее в выражении гравитационных закономерностей, чем скалярно-тензорная теория Дикке, повторяющая теорию Эйнштейна с добавлением скалярного поля. Однако, независимо от того, к какому подходу питать симпатии, следует отдать должное автору этой книги: он бережно подошел к подаче конкурирующих с его теорией фактов и идей и искренне стремился придерживаться объективности. Вероятно, истинная ревизия теории Эйнштейна оправдает себя и станет вообще возможной, лишь когда удастся построить последовательную квантовую теорию гравитации, адекватное описание мира в малом. Будем надеяться, что тогда удастся понять внутренние причины даже такого «самоочевидного» факта, как четырехмерность пространства-времени в классической области. Почему бы числу измерений не оказаться в микрогеометрии больше или, например, меньше, чем в макромире? Ведь даже из двух измерений можно зффективно, с приближительной не-

прерывностью при переходе к большим областям, получить большее число измерений, если выбрать запутанную топологию — некоторое подобие двумерной пены, в которой перескоки с одной оболочки на другую и дают увеличение числа степеней свободы. Такая гипотеза в корне изменила бы возможности описания ранних этапов Вселенной, а интегральные эффекты могли бы сказаться и на нашем этапе расширения. Мы привели здесь этот пример, чтобы показать качественно иной путь развития теории тяготения по сравнению с тем, который был избран проф. Дикке.

Но как бы ни стала развиваться теория в последующие годы, книга Р. Дикке будет еще долго интересовать всех друзей физики. Специалист возьмется за нее потому, что он знает имя Дикке. Философ найдет пищу для размышлений и, как всегда, для критики. Студенту эту книгу следует рекомендовать как отличный обзор, быстро вводящий в курс острых проблем теории гравитации и космологии. Тот факт, что этот обзор оживлен яркой личностью автора, только поможет любому из читателей.

Н. В. Мицкевич

ВСТУПЛЕНИЕ

Все представители рода человеческого сталкивались хоть с какими-нибудь проявлениями гравитации. В наш век весь мир стал свидетелем того, как открытый Ньютоном закон всемирного тяготения воплотился в фантастическом событии — посадке человека на поверхность Луны.

Прошло уже более полувека с тех пор, как Эйнштейн заложил основы и начал разработку новой, несравненно более глубокой теории тяготения, безгранично расширяющей пределы применимости ньютоновских представлений. И хотя имя Эйнштейна, этого титана научной мысли, хорошо известно в самых широких кругах, лишь очень и очень немногим дано в полной мере насладиться красотой и стройностью его общей теории относительности. Профессор Роберт Г. Дикке должен быть признан исключительно подходящей во всех отношениях кандидатурой для выполнения поистине геркулесова подвига — чтения девятих по счету Джэйновских лекций, когда необходимо ввести большую и пеструю аудиторию культурных людей с очень разнообразной подготовкой и интересами в круг вдохновляющих идей, представляющих поистине фундаментальный подход к механизму физического мира. Эти идеи, к тому же, тесно связаны с собственным обширным и блестящим вкладом проф. Дикке в науку.

Особенно удачно, что эти лекции читаются в залах именно нашего Института — памятника такому «законченному» ученому, каким был Вениамин Франклин, основатель Американского философского общества. Дело в том, что проф. Дикке демонстрирует такую же удивительную научную разносторонность, какая в прошлом была характерна для В. Франклина. Его разнообразные достижения простираются от конструирования радиолокатора до построения космологической модели. Он одинаково хорошо разбирается и в самых практических тонкостях эксперимента, и в таинствах умозрительных построений. Физик наших дней обычно специализируется либо как теоретик, либо как экспериментатор, но проф. Дикке сочетает в себе лучшие качества того и другого.

В отличие от частной теории относительности, которая обрела практическое приложение во множестве разделов современной экспериментальной физики, интересы новейшей теории тяготения ограничиваются главным образом рамками теории. Вскоре после того как Эйнштейн опубликовал в 1916 г. свою теорию, ее правильность как будто подтвердилась, когда удалось объяснить с ее помощью некоторые расхождения между данными астрономических наблюдений и тем, что предсказывала теория Ньютона. В последние годы, после долгого периода затишья, возродился интерес к экспериментальному изучению тяготения. Стимулом для этого послужило признание связи между гравитацией и другими областями физики и астрономии, равно как и разработка новой методики измерений и наблюдений.

В этих трех Джэйновских лекциях на тему «Гравитация и Вселенная» проф. Дикке полно и ясно рассказал о своих последних работах в этой области — переднем крае современной науки. Первая работа была посвящена виртуозному усовершенствованию эксперимента Этвеша, причем, подняв точность измерений в тысячу раз, удалось подтвердить (с точностью 10^{-11}) первоначальное ньютоновское утверждение об универсальности гравитационного ускорения — так называемый *принцип эквивалентности*¹. Следующим было исследование количественной оценки эффекта смещения перигелия Меркурия, основанное на его же трудах по дальнейшей разработке общей теории относительности — известной *скалярно-тензорной теории* тяготения. Исходя из своих измерений формы Солнца с точностью выше 10^{-4} , автор поставил под сомнение уже устоявшееся представление о полном согласии величины эффекта, диктуемого теорией Эйнштейна, и данных наблюдений по смещению перигелия орбиты Меркурия. И наконец, обсуждается космологическое значение недавно обнаруженного реликтового коротковолнового излучения первоначально раскаленной Вселенной, которое соответствует излучению

¹ Новую проверку принципа эквивалентности провели В. Б. Бринский и В. И. Паюв. Они улучшили результат Дикке, Кроткова и Ролла на полтора порядка, доказав эту эквивалентность с точностью $0,9 \cdot 10^{-12}$ (Журнал экспер. и теор. физики, 61, 873, 1971). — *Прим. перев.*

черного тела с температурой 3 К. Этот эффект был предсказан проф. Дикке и обнаружен его группой в Принстонском университете.

Аудитория, собравшаяся во Франклиновском институте, приняла все Джэйновские лекции 1969 г. с увлечением и энтузиазмом, и это как нельзя лучше подтверждает, что проф. Дикке обладает тем даром скромности и обезоруживающего мастерства, который необходим для духовного контакта со слушателями всех возрастов.

Мартин А. Померанц

ПРЕДИСЛОВИЕ

Когда Американское философское общество предложило мне выступить в Джэйновских лекциях 1969 г., я с радостью согласился. Одной лекции было бы явно недостаточно, чтобы развить полностью основную идею, и меня очень устраивала перспектива прочесть серию из трех лекций, предназначенных главным образом для широкой аудитории.

Эти лекции были организованы Франклиновским институтом в Филадельфии и Философским обществом и прочитаны в Институте 13, 18 и 20 февраля 1969 г. В основу всех трех лекций легли два главных вопроса. Первый: можно ли по данным наблюдений отличить общую теорию относительности (эйнштейновскую теорию тяготения) от скалярно-тензорной теории, которая также является общерелятивистской и тесно связана с теорией Эйнштейна? Второй вопрос: как физику-экспериментатору выполнять решающие опыты по гравитации, если гравитационное взаимодействие по самой своей природе настолько слабо, что в лабораторных условиях его релятивистские проявления пренебрежимо малы? Очевидно, что нельзя дать ответа на первый вопрос, не ответив сначала на второй.

Громадные успехи, которых достигли физики за последние два столетия, в значительной мере обусловлены направленностью усилий к одной или немногим узким целям, заостренным вниманием к какому-то одному аспекту физического мира, причем этот аспект мысленно отделялся от всего остального физического мира. Так привычка и опыт навязывали физикам ограниченный кругозор. Их наука была чисто экспериментальной, и в своей маленькой лаборатории они воображали себя отрезанными от остального сложного мира.

Однако для того, чтобы выполнить решающие гравитационные опыты, физики должны отказаться от этого привычного взгляда. Их лабораторией должны стать Земля, Солнце, Солнечная система и даже вся Вселенная в целом. Но для опытов, проводимых в такой космической лаборатории, существуют суровые ограничения. Эти опыты нужно выполнять посредством приборов, состоящих из уже су-

ществующих астрономических объектов, и вне власти экспериментатора вносить в них какие-либо изменения. Такие гигантские физические системы крайне сложны и с трудом поддаются истолкованию.

Подход физика к природе связан с интересной философской проблемой. Можно ли в ходе выполнения лабораторного опыта игнорировать остальную часть Вселенной? Следует признать, что в принципе и физик, и его приборы так прочно связаны с остальной частью Вселенной, так органически погружены в нее, что даже мысленное разделение их невозможно.

По мнению Дж. Беркли и Э. Маха, имеет смысл лишь такое движение материи, которое происходит относительно другой материи. При построении теории относительности Эйнштейн испытывал влияние идей Маха — как этой, так и той, что наблюдаемые в ускоренно движущейся лаборатории силы инерции обусловлены распределением материи вдали от лаборатории.

В теории тяготения Эйнштейна ориентация инерциальной системы отсчета относительно общего распределения масс обусловлена этим распределением. Но в этой теории, помимо указанной несколько тривиальной взаимосвязи, распределение материи во Вселенной вдали от лаборатории не приводит к другим эффектам, наблюдаемым в лаборатории.

В скалярно-тензорной теории тяготения взаимосвязь Вселенной и лаборатории несколько более непосредственная, но и здесь внешнее распределение материи не оказывает влияния на негравитационные физические процессы. Однако имеется важное различие между этими теориями: в последней силы гравитационного взаимодействия монотонно убывают по сравнению с силой других взаимодействий. Скалярное поле, генерируемое распределением материи во всей Вселенной, распространяется через всю Вселенную, проникает сквозь стены лаборатории и проявляется в гравитационном эксперименте, регулируя силу взаимодействия. Правда, и здесь реальный эффект мал. Обусловленное медленно меняющимся скалярным полем ожидаемое изменение гравитационной «постоянной» составляет всего $(1-2) \cdot 10^{-11}$ в год (в относительных единицах). Привязав лабораторию к локально инерциальной

системе отсчета, можно в обеих теориях практически пренебречь остальной частью Вселенной, хотя с принципиальной точки зрения лаборатория от нее неотделима.

Гравитационное поле, опыт с которым описан в первой лекции, генерируется Солнцем, хотя влияние этого поля измеряется в лаборатории. Здесь в наши намерения не входит сравнение двух теорий тяготения — скорее, этот высокоточный опыт подводит солидную наблюдательную базу под обе теории сразу.

Вторая лекция посвящена давно известному эксперименту, впервые обсуждавшемуся Эйнштейном. В нем источником статического гравитационного поля вновь служит Солнце. Оно вместе с планетой Меркурий и составляет наш прибор. Рассматривается сплюснутость Солнца и ее влияние на результаты наблюдений. Давно известно, что эллиптическая орбита Меркурия медленно поворачивается в пространстве, что в первую очередь вызвано гравитационным воздействием со стороны других планет. Уже давно это движение было частично объяснено релятивистским эффектом, но открытие факта несферичности Солнца заставляет нас пересмотреть это истолкование. Можно полагать, что около 10% смещения перигелия, которое ранее считалось релятивистским, в действительности обязано нерелятивистскому воздействию со стороны несферического Солнца.

В третьей лекции рассматривается самая большая из возможных физических систем — Вселенная в целом. Ввиду ее чудовищных размеров и возраста в ней очень существенны релятивистские эффекты. К тому же каждая из двух теорий дает свой ряд специфических предсказаний. Важно то соображение, что Вселенная развилась из чрезвычайно горячего «огненного шара»; разные теории делают существенно разные предсказания относительно образования гелия в таком «шаре». Анализ происхождения шаровых звездных скоплений нашей Галактики также приводит к нескольким различным результатам, смотря по тому, какой из теорий тяготения мы пользуемся.

Мне бы очень хотелось, подводя итоги, привести решительные аргументы в пользу той или иной из двух теорий тяготения (или против нее), но у меня нет такой возможности. Однако удалось показать, каким образом космиче-

ская физика и внелабораторный опыт могут послужить исследованию сверхслабого гравитационного взаимодействия. Я нахожу вдохновляющим тот факт, что одна из фундаментальных проблем физики получает освещение через разрозненные и запутанные аспекты наук, которые по традиции считаются лежащими вне рамок компетенции физики.

1. ОПЫТ ЭТВЕША И ГРАВИТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ.

Единственными известными физическими взаимодействиями дальнего радиуса действия являются электромагнитное и гравитационное. Эти взаимодействия приводят к силам, с которыми тела действуют друг на друга на расстоянии. Известно также и два класса сил короткого радиуса действия: «сильное взаимодействие», которое, в числе прочего, уравнивает силы электростатического отталкивания между протонами и сохраняет целостность атомного ядра, и «слабое взаимодействие», ответственное за радиоактивный распад — самопроизвольное превращение одного атомного ядра в другое с испусканием электрона или позитрона. Самым сильным из известных является только что названное «сильное взаимодействие», тогда как самым слабым является гравитационное. Сила гравитационного взаимодействия между протоном и электроном в атоме водорода составляет всего лишь $4 \cdot 10^{-40}$ от силы электростатического притяжения, удерживающего электрон в атоме.

Чрезвычайная слабость гравитационного взаимодействия препятствует его экспериментальному исследованию в лабораторных опытах обычного типа. Физик-экспериментатор по традиции привязан к лаборатории. Его достижения в значительной мере связаны с концентрацией усилий на каком-то одном отдельном аспекте физики и с затворничеством в лаборатории, изолированной от всех воздействий со стороны внешнего мира. Тот факт, что такая изоляция вообще в принципе возможна, объясняется счастливым сочетанием трех обстоятельств: а) короткодействующим характером исследуемых сил и связанной с этим локализуемостью процессов; б) реальной возможностью исключить возмущения со стороны электромагнитных взаимодействий длинного радиуса действия, проходящие извне лаборатории, посредством экранировки; наконец, в) тем свойством тяготения (по самой своей природе не поддающегося экранировке), что на свободно падающей Земле исчезают возмущения, которые это взаимодействие дальнего радиуса действия приносит из удаленных частей Галактики.

Чрезвычайная слабость гравитационного взаимодействия ведет к тому, что лишь объединение в телах астрономических масштабов множества атомов способно породить гравитационные поля достаточной силы для успешного проведения гравитационного эксперимента. Физикам недоступно построение столь гигантских приборов в их лабораториях; поэтому им приходится покидать стены лаборатории, вступая в область астрофизики и геофизики, чтобы проводить решающие гравитационные опыты.

К счастью, наша Вселенная содержит такое множество объектов, и эти объекты так разнообразны по своим размерам, что находчивый экспериментатор может рассчитывать найти в ней уже готовые и действующие приборы, дающие фундаментальную информацию о природе тяготения. Последняя из этих лекций будет посвящена самому большому из таких приборов — самой Вселенной в целом. В ней мы проследим, как структура и история развития Вселенной увязываются с природой тяготения.

Те гравитационные опыты, которые интересуют нас сейчас, используют принцип относительности. Вообще говоря, для них требуются такие массивные и плотные тела, что орбитальное движение спутников вокруг них может совершаться со скоростями, приближающимися к скорости света. Телами этого типа могут быть пульсары и квазары, и можно надеяться, что в ближайшие годы подробное исследование этих загадочных объектов даст существенно новую информацию о природе тяготения. Главная трудность — это большие расстояния до них, и пока что большую часть информации мы получаем, используя менее подходящее, но гораздо более доступное астрономическое тело — наше Солнце.

Солнце массивно, но не слишком плотно. Воображаемая планета будет обращаться около его поверхности со скоростью 240 км/с, или $1/700$ скорости света. Скорость движения Земли по орбите составляет всего 10^{-4} скорости света.

В Солнечной системе релятивистские эффекты очень малы, и требуется большая тщательность, чтобы провести измерения с необходимой степенью точности. Эксперименты, лежащие в основе релятивистских теорий тяготения, распадаются на два класса — совокупность экспериментов,

которые дают отрицательные или положительные результаты [1]. Три знаменитых эффекта, служащих для проверки общей теории относительности, принадлежат к числу последних. Свидетельством гениальности Эйнштейна служит тот факт, что уже в своей первой работе по общей теории относительности — статье о гравитации, опубликованной в 1916 г. — он смог назвать все эти три эффекта для проверки теории [2]. Я опишу соответствующие наблюдения и их современные варианты в следующей лекции.

Сейчас же я займусь опытом Этвеша [3] — одним из «отрицательных» экспериментов. Под «отрицательным» экспериментом я понимаю исключительно тонкую проверку теории, при которой, если теория неверна, должен обнаружиться некоторый эффект, а если теория верна, этот эффект не обнаруживается, т. е. получается отрицательный результат. На мой взгляд, совокупность «отрицательных» экспериментов дает самые важные и убедительные наблюдательные основания для теории гравитации.

Не следует думать, что Эйнштейн строил свою теорию тяготения чисто дедуктивным путем, исходя из наблюдательных данных. Это отнюдь не так. Эйнштейн, конечно, знал об этих немногих фундаментальных фактах и полностью их учитывал. Однако общая теория относительности возникла, скорее, на основании интуиции и философского мышления, чем на базе непосредственного использования конкретных наблюдательных данных. В своих «Автобиографических заметках» Эйнштейн в возрасте 67 лет попытался восстановить ту историческую обстановку и настроения, которые привели его к общей теории относительности [4]. Я очень рекомендую всем эту увлекательную историю, однако сегодня мы займемся другим вопросом.

В конечном счете любая теория проверяется наблюдениями. Наблюдения могут лечь в основу теории, могут соответствовать теории, но не могут служить доказательством ее полной справедливости. Ведь одно-единственное наблюдение может опровергнуть теорию, тогда как окончательное доказательство ее справедливости не представляется возможным.

Сегодня, рассматривая опыт Этвеша — важнейший из «отрицательных» экспериментов, — я попытаюсь возможно полнее раскрыть его теоретическое значение. Я надеюсь

сделать больше, чем просто проанализировать, согласуется ли этот опыт с общей теорией относительности.

В последние годы довольно много дискутировалась другая общерелятивистская теория тяготения, также основанная на идеях Эйнштейна и именуемая *скалярно-тензорной* теорией гравитации [5, 6]. Можно считать, что эта теория в определенной мере подтверждается рядом наблюдательных фактов, в том числе сплюснутостью Солнца [7], о чем я буду говорить в следующей лекции.

При анализе опыта Этвеша и его последующих вариантов я рассмотрю сам эксперимент и выводы, вытекающие из него, а также поставлю вопрос: в какой мере он подтверждает общую теорию относительности [2] или скалярно-тензорную теорию гравитации [16]? Кроме того, я опишу его решающий вариант, пока что не осуществленный [8, 19].

ОПЫТ ЭТВЕША

Этот опыт столь многогранен и интересен, что я даже не знаю, с чего начать. Во-первых, замечательна сама биография венгерского барона Роланда фон Этвеша [9]: едва избежав увлечения арктическими исследованиями, он в возрасте 22 лет получил степень доктора наук, а в 24 года стал ординарным профессором. Во-вторых, интересна история опыта Этвеша. Истоки этого эксперимента прослеживаются назад, по-видимому, до античных времен, а к числу первых исследователей следует отнести таких выдающихся ученых, как Галилей, Ньютон и Бессель [10]. В-третьих, речь идет о тонкостях современного эксперимента и выводах из него. Найдется мало экспериментов, которые были бы принципиально проще и в то же время труднее выполняемыми и глубже по значимости.

Опыт Этвеша ставится с целью ответить на вопрос: зависит ли гравитационное ускорение тела от его природы?

Вполне вероятно, что уже один из наших древних предков, будучи пытливей большинства других, мог оказаться первым исполнителем этого опыта (в его примитивной форме), когда, сбив камнем с дерева белку, он случайно заметил, что его завтрак и камень упали на землю приблизительно одновременно.

В своем варианте этого опыта Галилей, возможно, на самом деле и не занимался сбрасыванием деревянных и железных шаров с падающей башни в Пизе, но это едва ли существенно, так как он проводил совершенно эквивалентные опыты с катящимися шарами. Галилей был первым ученым, который четко сформулировал принцип эквивалентности.

Хотя сэр Исаак Ньютон был великим теоретиком, его вариант этого опыта отличался изяществом и к тому же так прост, что может быть выполнен в домашних условиях с помощью пустых банок и проволоки. Схема его проста: нужно подвесить две банки на длинных кусках проволоки так, чтобы они могли раскачиваться, как маятник. Затем наполнить их до краев водой и дать качаться, предварительно сделав периоды колебаний примерно одинаковыми. Заметить, через какие промежутки времени фазы колебаний совпадают. После этого вылить из одной банки воду и заменить ее подсолнечным маслом, песком или каким-нибудь другим веществом и снова определить время между совпадениями фаз. При этом с точностью до десятых долей процента оказывается, что период колебаний не зависит от содержимого банки.

Опыт, который провел сам Этвеш в 1909 г., по точности в 10^5 раз превосходит опыт Ньютона [3]. Взяв статические крутильные весы, на концах плеч которых были подвешены грузы из разных веществ, Этвеш, Пекар и Фекете достигли точности $5 \cdot 10^{-9}$. На рис. 1 приведено старинное изображение крутильных весов Этвеша.

Среди веществ, испытанных Этвешем, были такие экзотические, как асбест, тальк и змеиное дерево, хотя теперь мы знаем, что для ответа на те фундаментальные вопросы, на которые был нацелен опыт Этвеша, требуется сравнивать элементы, которые были бы существенно различны по содержанию элементарных частиц, энергии связи ядра, электростатической энергии и скорости частиц. Для этого больше всего подходят тяжелые и легкие элементы. К счастью, среди образцов, выбранных Этвешем для своих опытов, были платина и легкие элементы.

Единственное современное повторение опыта Этвеша было осуществлено Роллом, Кротковым и мною [11]. У Этвеша не было ни оборудования для получения высокого

вакуума, ни электронных приборов, и я решил, что с помощью новейшей техники можно без труда поднять точность измерений порядка на два. Нам удалось поднять

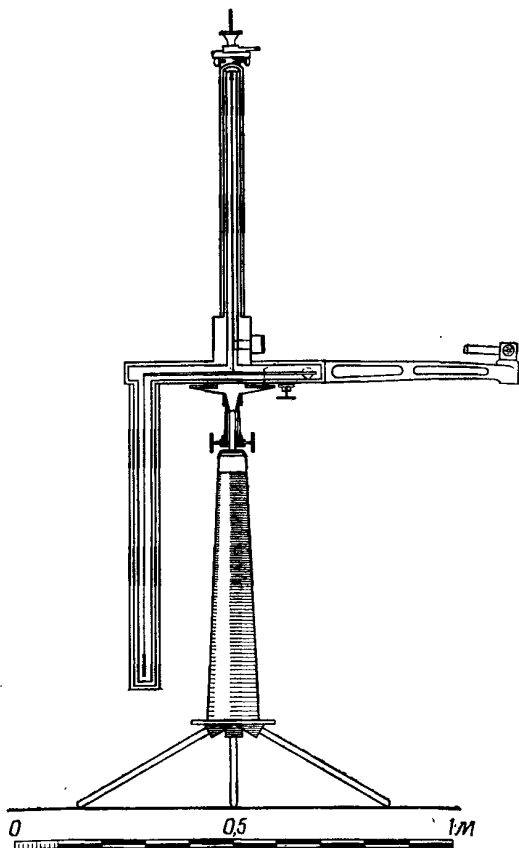


Рис. 1. Схема крутильных весов типа использованных Этвешем.

точность в 500 раз, но это было нелегко и потребовало много времени.

В качестве источника гравитационного поля Этвеш использовал Землю, тогда как мы выбрали Солнце. Под

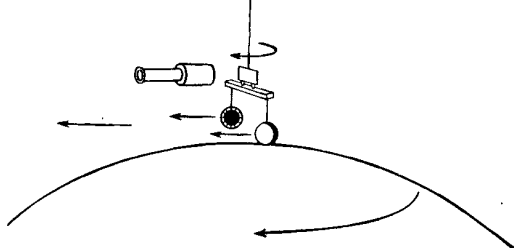


Рис. 2. Принципиальная схема принстонского варианта опыта Этвеша. В 6 часов утра и вечера ускорения обоих массивных шаров, направленные к Солнцу, горизонтальны. Если ускорения шаров неодинаковы, коромысло весов повернется.

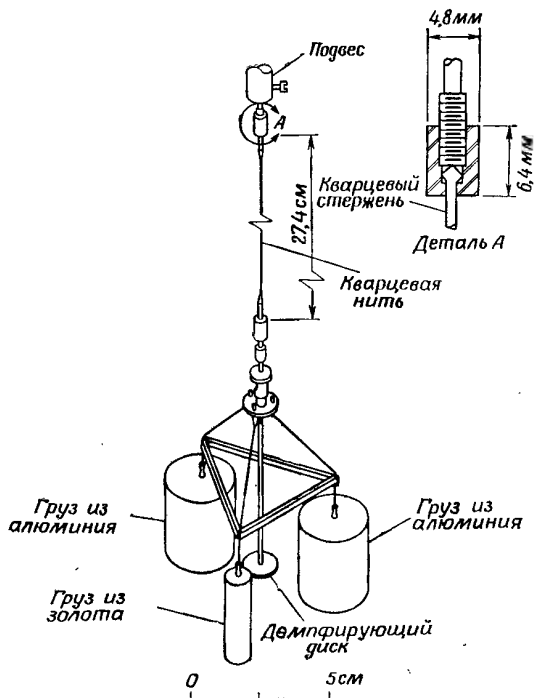
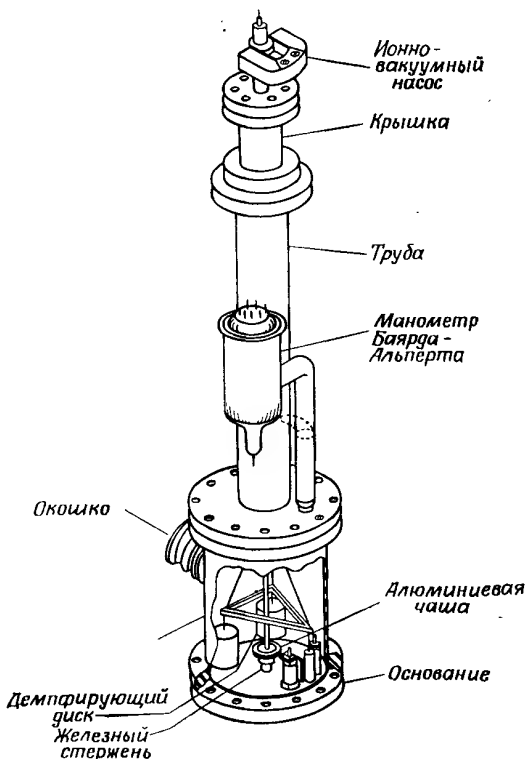


Рис. 3. Детали устройства принстонских весов. Использование трех грузов обеспечивает более четкое выделение оси симметрии.

действием солнечного гравитационного притяжения Земли, лаборатория и исследуемые образцы приобретают ускорение в направлении Солнца, равное $0,6 \text{ см/с}^2$. Мы смогли показать с точностью $1 \cdot 10^{-11}$, что ускорения золота и алю-



Р и с. 4. Устройство вакуумного контейнера, в который помещались крутильные весы.

миния одинаковы. Оказалось, что ускорения этих двух веществ едва ли различаются много больше, чем на $6 \cdot 10^{-12} \text{ см/с}^2$. Чтобы представить себе эту величину, скажем, что тело, разгоняющееся из состояния покоя с таким ускорением, приобретет за 3000 лет «грандиозную» скорость: 6 мм/с.

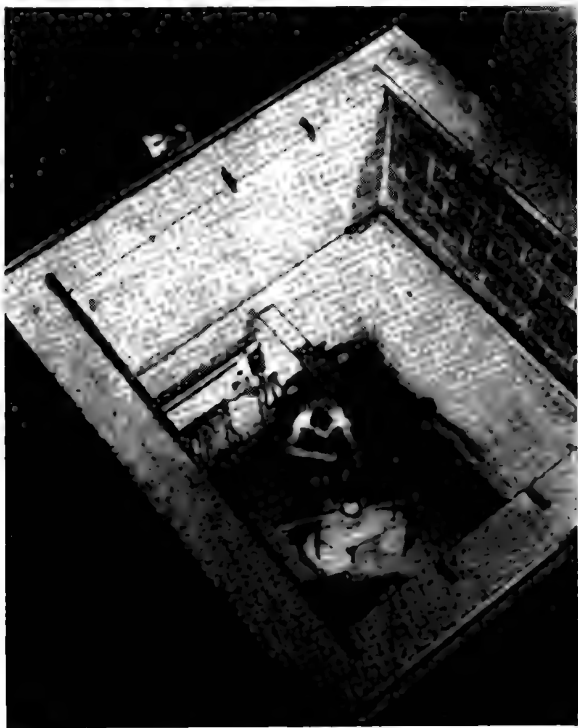


Рис. 5. Шахта, в которой установлены крутильные весы. При проведении измерений людей в подвале не было, и он был накрыт крышкой толщиной около метра, в которую была вмонтирована электрическая установка для кондиционирования.

Принципиальная схема опыта приведена на рис. 2. В 6 часов утра грузы располагаются так, что малейшая их тенденция неодинаково падать в сторону Солнца вызовет вращение крутильных весов. Полсуток спустя это вращение сменится противоположным. Внешний момент сил, необходимый для компенсации такого вращении, регистрируется и исследуется. Это позволяет выявить присутствие 24-часовой периодичности закручивающего момента сил.

Конструкция использовавшихся весов показана на

рис. 3. Чтобы свести к минимуму возмущения от сдвигов масс, распределенных на поверхности Земли, на крутильном подвесе помещено не два груза, а три — один из золота и два из алюминия.

Для максимального снижения роли сторонних возмущающих моментов весы в сосуде с высоким вакуумом помещались в глубокую термостатированную шахту, удаленную от зданий. Даже в условиях глубокого вакуума тре-

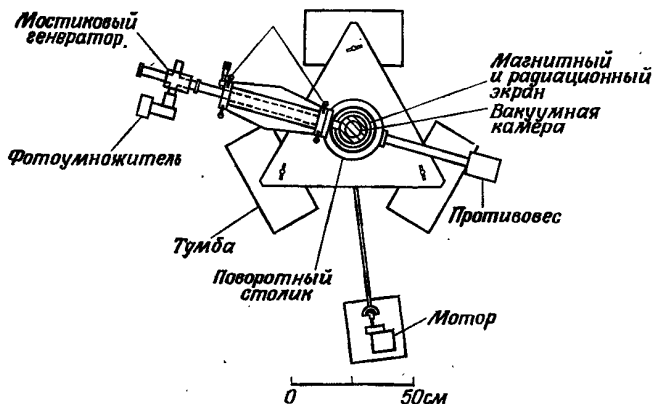


Рис. 6. Вид установки сверху.

бовалось поддерживать постоянную и повсюду одинаковую температуру. Нетрудно подсчитать, что в откачанном сосуде разность температур между противоположными стенками, превышающая 10^{-5} К, могла бы испортить весь эксперимент (рис. 4—6).

На рис. 7 схематически показана блок-схема установки. Вверху, в левой части изображен треугольный крутильный подвес (вид сверху). К грузу из золота прилагается крайне слабый момент вращения, возбуждаемый электрическим полем. Знак и величина этого момента задаются углом ориентации подвеса по схеме обратной связи. Этот момент уравнивает все закручивающие моменты внешнего происхождения, приложенные к подвесу, и автоматически препятствует его вращению. Включение такой

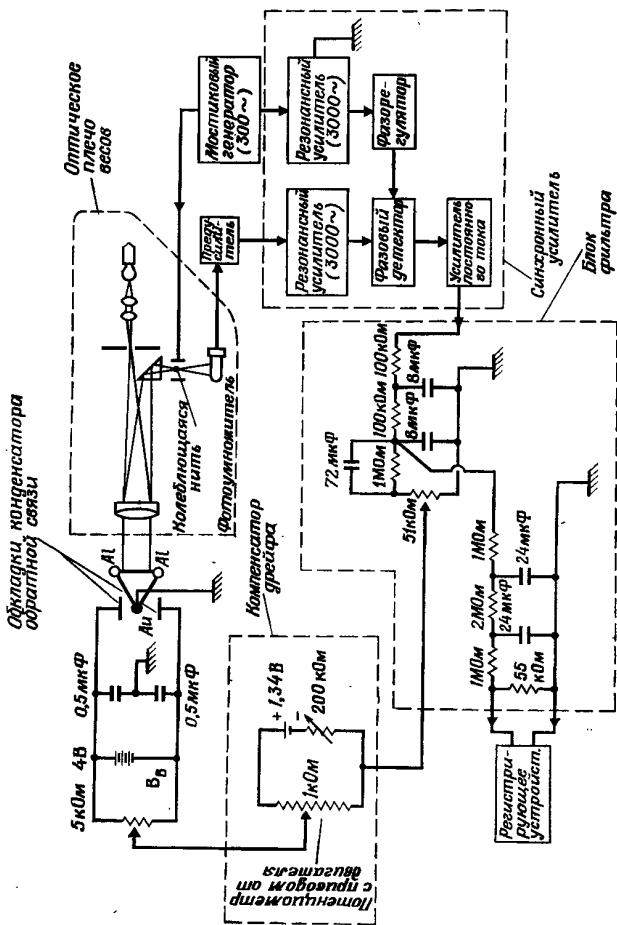


Рис. 7. Блок-схема системы.

«обратной связи по скоростям» приводит к сильному затуханию свободных колебаний подвеса, что чрезвычайно способствует быстрому устранению любых приходящих извне возмущений (например, от проезжающих грузовиков): при наличии обратной связи они затухают за считанные минуты, а не за несколько часов.

Блок измерения поворота изображен в правом верхнем углу рис. 7. Идущий от освещенной щели луч отражается

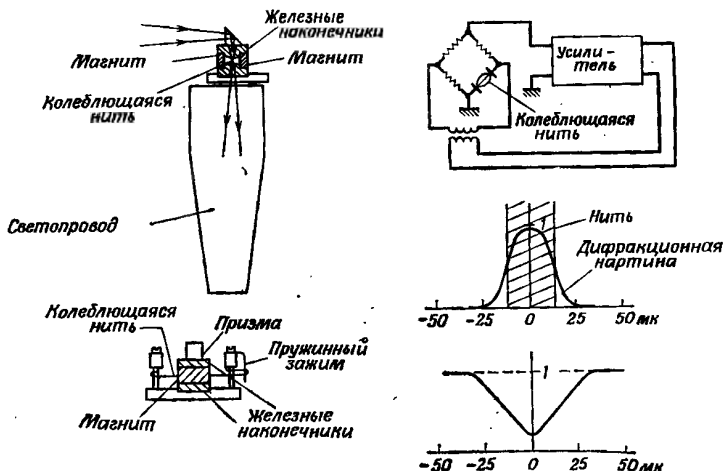


Рис. 8. Детектор малых поворотов с колеблющейся нитью.

полированной гранью кварцевого треугольника и затем фокусируется ахроматической линзой, давая изображение на колеблющейся нити детектора поворота, как это показано на рис. 8. Световой луч, в котором находится колеблющаяся нить, попадает на фотоумножитель.

При правильной центровке изображения щели на колеблющейся нити поток света модулируется с частотой, равной удвоенной частоте колебаний нити. При нарушении центровки в модуляции обнаруживается основная частота. Она-то и фиксируется и служит мерой поворота крутильного подвеса. Такое устройство в высшей степени чувстви-

Таблица

Средние значения $\gamma(Au, Al) = \left(\frac{M}{m}\right)_{Au} - \left(\frac{M}{m}\right)_{Al}$ и их вероятные ошибки

Исключены ли точки со ср. кв. отклонениями > 3	Ориентация телескопа	Поправка на T_2 не учтена, $B(T_2) \approx 0$	Поправка на T_2 учтена, $B(T_2) \approx 6,3 \cdot 10^{-8}$	Поправка на T_5 учтена, $B(T_5) \approx 5,4 \cdot 10^{-8}$
Нет	Север	$(+2,22 \pm 1,42) \cdot 10^{-11}$	$(1,38 \pm 1,27) \cdot 10^{-11}$	$(1,30 \pm 1,25) \cdot 10^{-11}$
Нет	Юг	$(-2,53 \pm 1,94) \cdot 10^{-11}$	$(-0,25 \pm 2,70) \cdot 10^{-11}$	$(4,33 \pm 1,73) \cdot 10^{-11}$
Нет	Север+юг	$(-0,09 \pm 1,20) \cdot 10^{-11}$	$(0,59 \pm 1,45) \cdot 10^{-11}$	$(1,32 \pm 1,04) \cdot 10^{-11}$
Да	Север	$(+2,22 \pm 1,42) \cdot 10^{-11}$	$(1,38 \pm 1,27) \cdot 10^{-11}$	Значений со ср. кв.
Да	Юг	$(-0,59 \pm 1,51) \cdot 10^{-11}$	$(2,44 \pm 2,00) \cdot 10^{-11}$	отклонением > 3
Да	Север+юг	$(+0,89 \pm 1,03) \cdot 10^{-11}$	$(1,94 \pm 1,15) \cdot 10^{-11}$	не было

Au—золото, Al—алюминий, M —гравитационная масса груза; m —инертная масса груза;

T_2 и T_5 —температура воздуха по измерениям второго и пятого термисторных датчиков соответственно;

$B(T_2)$ и $B(T_5)$ —константы второго и пятого термисторных датчиков, различные у разных инструментов и измеряемые в единицах солнечного закручивающего момента, равного $58,6$ дин. см на 1°C .

тельно и позволяет обнаруживать повороты даже на угол 10^{-9} рад.

Слева на рис. 7 показан блок компенсатора дрейфа. Даже по истечении многих месяцев работы тонкая кварцевая нить крутильного подвеса продолжает медленно и упорно раскручиваться. Этот ничтожный, но все нарастающий момент вращения компенсируется моментом вращения от электрического устройства с программным управлением.

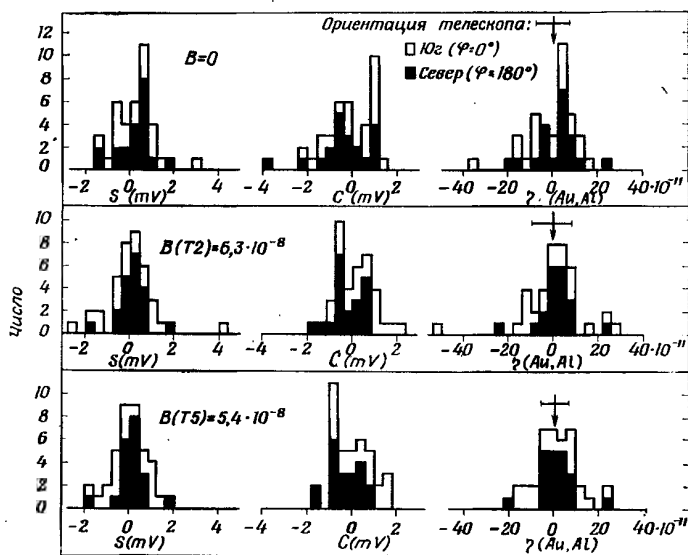


Рис. 9. Диаграмма распределения экспериментальных данных.

После установки инструмента шахта запечатывалась, а весы контролировались дистанционно из удаленной приборной будки на протяжении нескольких месяцев подряд (рис. 5). Как было упомянуто выше, мы обнаружили, что ускорения алюминия и золота в направлении Солнца равны с точностью 10^{-11} . В таблице приведены результаты измерений за период в девять месяцев. В третьем столбце

сведены данные, не учитывающие влияния на подвес изменений температуры в подвале с 24-часовым периодом. Приведенные численные значения соответствуют разности гравитационных ускорений в направлении Солнца для золота и алюминия. В четвертом и пятом столбцах даны результаты, полученные после учета изменений температуры согласно показаниям двух термисторов, расположенных в разных местах подвала.

Распределение измеренных значений приведено на рис. 9 справа. Левые и средние распределения изображают синусоидальные и косинусоидальные компоненты 24-часового периода изменения напряжения в цепи обратной связи, подводимого к подвесу. Справа изображены распределения отдельных измерений, средние значения которых даны в первых двух строках таблицы.

ЗНАЧЕНИЕ ОПЫТОВ ЭТВЕША

В теории Эйнштейна тяготение описывается единственным тензорным полем, интерпретируемым обычно (хотя и не всегда) как поле метрического тензора геометрии пространства-времени. Согласно этой теории, достаточно малые пробные тела падают с одним и тем же ускорением. Это действительно центральный для всей теории вывод, являющийся проявлением принципа эквивалентности — опоры всей теории.

Уточним, что эта универсальность гравитационного ускорения отражает лишь «слабый» принцип эквивалентности, а теория тяготения Эйнштейна основывается на «сильном» принципе [1, 8, 12]. Под «слабым» принципом эквивалентности понимают эквивалентность действий тяготения и ускорений в малых областях пространства. В свободно падающей кабине лифта, когда эта кабина и все ее содержимое падают с одинаковым ускорением, гравитационная сила исчезает. Эта мысль иллюстрируется рис. 10, где изображено возникновение в небольшой лаборатории силы, подобной силе тяжести, благодаря простому пружинному устройству, ускоряющему лабораторию.

Говоря о «сильном» принципе эквивалентности, имеют в виду, что в свободно падающей и невращающейся лаборатории законы физики (включая численные значения ве-

личин) одинаковы повсюду, включая области без гравитации. Таким образом, «сильный» принцип содержит более широкое утверждение, чем «слабый», но именно «слабый» принцип, и только он один, непосредственно подтверждается опытом Этвеша.

Общая теория относительности Эйнштейна построена так, что в соответствующей системе отсчета (т. е. в свободно падающей без вращения лаборатории) в малой области

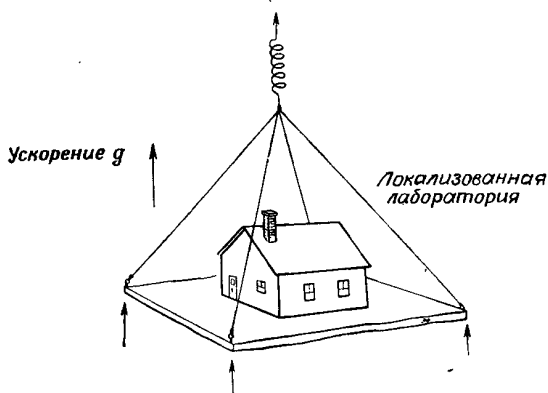


Рис. 10. «Слабый» принцип эквивалентности. Физические процессы протекают в равномерно ускоренной лаборатории в отсутствие тяготения точно так же, как в гравитационном поле.

пространства-времени физические законы принимают стандартный вид и стандартное численное выражение. Так в этой теории реализуется «сильный» принцип эквивалентности: это результат описания тяготения с помощью одного лишь симметричного метрического тензора. «Соответствующей системой отсчета» здесь является та система, в которой метрический тензор в кабине лифта принимает стандартный вид, совпадающий с видом метрического тензора в инерциальной системе отсчета в отсутствие тяготения.

Скалярно-тензорная теория тяготения отличается от общей теории относительности добавлением к полю метрического тензора еще скалярного поля. Это последнее оказывает локальное влияние на силу гравитационного взаимо-

действия, так что «сильный» принцип эквивалентности уже не выполняется, ибо в этой теории гравитационная «постоянная» не постоянна и вместе с тем эта величина, приведенная к безразмерному виду, входит в численные выражения физических законов.

В этой теории скалярное поле принципиально позволяет описывать релятивистские изменения и других «констант», кроме гравитационной. Так, например, отношения масс протона и нейтрона или заряд электрона могут быть функциями этого скаляра.

Интересно, что опыт Этвеша, касающийся непосредственно лишь «слабого» принципа эквивалентности, тем не менее снабжает нас ценной информацией и о «сильном» принципе. Это видно из следующего примера. Допустим, что масса нейтрона растет при подъеме на некоторую высоту (относительно масс протона и электрона), так что внутренняя энергия содержащего нейтроны атома растет с высотой по сравнению с энергией атома, не содержащего нейтронов (атом водорода). Тогда для того, чтобы поднять вверх наше обогащенное нейтронами вещество, на единицу инертной массы потребуется совершить больше работы, чем для поднятия водорода. Обогащенное нейтронами вещество будет иметь аномально большой вес для своей массы, т. е. станет падать с аномально большим гравитационным ускорением. Наблюдение Этвешем того факта, что легкие и тяжелые атомы падают с чрезвычайно близкими гравитационными ускорениями, накладывает весьма жесткие ограничения на возможную переменность с высотой (или с изменением скалярного поля) отношения масс нейтрона и протона [13, 14]. Если такая переменность и существует в природе, она должна быть ничтожно слабой.

Рассуждения такого рода можно продолжить, и на основании нашего принстонского опыта, проведенного с высокой степенью точности, я заключаю, что только гравитационная «постоянная» и «константа» слабого взаимодействия могли бы существенно зависеть от скалярного поля. В число эффектов, которые уже могут быть исключены, входят переменность заряда электрона и константы сильного взаимодействия.

Эти рассуждения и соответствующие выводы настолько важны, что я уделю им немного больше внимания. Здесь

полезно рассмотреть «мысленный эксперимент», базирующийся на трех ключевых предположениях:

1) Инертная масса тела пропорциональна полному содержанию в нем энергии (знаменитое соотношение $E=Mc^2$). Это самая суть частной теории относительности Эйнштейна, всесторонне подтверждаемой множеством ла-

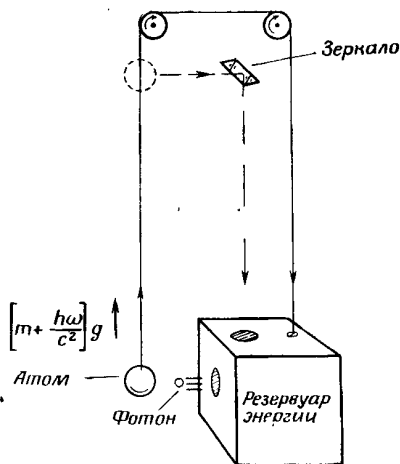


Рис. 11. «Мысленный» эксперимент, объясняющий причины гравитационного красного смещения. «Мысленная» установка этого же типа использована для анализа связи между опытом Этвеша и «сильным» принципом эквивалентности.

бораторных опытов, особенно с использованием элементарных частиц высоких энергий.

2) Тяжелые и легкие атомы падают с одинаковым гравитационным ускорением (опыт Этвеша).

3) В статическом гравитационном поле энергия замкнутых систем сохраняется.

Для этого «мысленного» эксперимента понадобится «мысленный» прибор, изображенный на рис. 11.

Представим себе такую последовательность событий:

а) фотон, испущенный из резервуара энергии, переводит атом из основного в возбужденное состояние; б) черпая

энергию из того же резервуара, мы поднимаем вверх возбужденный атом; в) возбужденный атом излучает фотон, который поглощается резервуаром энергии, и атом возвращается в свое основное состояние; г) наконец, атом опускают вниз в исходное положение.

Итак, атом вновь находится в своем основном энергетическом состоянии, а вся энергия на каждом этапе заимствовалась из резервуара энергии и возвращалась в него. Если потребовать сохранения энергии, то полное изменение энергии резервуара должно быть равно нулю. Однако возбуждение атома повысило его энергию, а значит, его массу и вес. Поэтому для того, чтобы поднять возбужденный атом, потребуется больше энергии, чем ее вернется в резервуар, когда мы опустим атом, вернувшийся в основное состояние. Чтобы энергия сохранялась, необходимо, чтобы возвращающийся в резервуар фотон был более голубым (нес больше энергии), чем фотон, взятый из резервуара. Это превышение энергии для возвращающегося фотона должно быть равно энергии, потребовавшейся для поднятия массы, соответствующей энергии первого фотона.

Такое голубое смещение (или красное смещение для фотона, испущенного вниз, по сравнению с фотоном, испущенным вверх) было предсказано Эйнштейном с самого начала. Наблюдение его в спектральных линиях солнечного излучения имеет уже длинную и запутанную историю. Технические трудности были преодолены лишь в последние годы, и с точностью 5% было обнаружено ожидаемое красное смещение [15]. Красное смещение было обнаружено также (и с еще большей точностью) в лабораторных условиях при использовании эффекта Мессбауэра для гамма-лучей [16].

Как же связан наш «мысленный» эксперимент с «сильным» принципом эквивалентности [1]? Неизменность численного выражения законов физики требует постоянства энергии возбуждения атома. Представим себе, что верно обратное, а именно, что энергия возбуждения атома растет с высотой, в силу чего возвращающийся в резервуар фотон должен обладать еще большей энергией. Так как энергия должна сохраняться, такому росту энергии фотона, излученному вверх, должно соответствовать увеличение энергии, требующейся для поднятия возбужденного атома.

Предположим, что вес F_0 атома в основном энергетическом состоянии определяется его массой M_0 :

$$F_0 = M_0 g = E_0 g / c^2, \quad (1)$$

где M_0 и E_0 — инертная масса и полная энергия атома, а g и c — ускорение силы тяжести и скорость света.

Вес возбуждения атома равен

$$F = \frac{E_1 g}{c^2} + \frac{dE_1}{dh} = (E_0 + \Delta E) \frac{g}{c^2} + \frac{d(\Delta E)}{dh}, \quad (2)$$

где E_1 — полная энергия атома в возбужденном состоянии, $\Delta E = E_1 - E_0$ — энергия возбуждения атома, а последнее слагаемое в уравнении (2) описывает изменение этой энергии с высотой h . Это последнее слагаемое и есть тот аномальный вес, который связан с изменением энергии возбуждения атома при изменении высоты. Этому аномальному весу соответствует аномальное гравитационное ускорение [1, 14]:

$$\delta g = \frac{c^2}{E_1} \frac{dE_1}{dh}. \quad (3)$$

Независимо от причины изменение полной внутренней энергии атома с высотой приводит к аномальному весу, а значит, и к аномальному ускорению согласно уравнению (3). Принимая, что принстонский вариант опыта Этвеша дает оценку $|\delta g/g| < 2 \cdot 10^{-11}$, заключаем, что

$$\left| \frac{dE_1}{dh} \right| < 2 \cdot 10^{-11} \frac{E_1 g}{c^2}. \quad (4)$$

Рассуждения такого рода можно распространить на разнообразные случаи. Допустим, например, что квадрат элементарного заряда e^2 является функцией гравитационного скалярного поля скалярно-тензорной теории тяготения. (Строго говоря, такая постановка вопроса неточна. Элементарный заряд — это физическая постоянная, выражаемая числом, которому приписана физическая размерность. Число это может как угодно меняться, если Бюро стандартов начнет менять единицы измерения, и только безразмерные числа не страдают этим пороком. Таким числом является постоянная тонкой структуры $e^2/hc \approx 1/137$. Если счи-

тать, что постоянная Планка $\hbar$ и скорость света c по определению постоянны, т. е. система единиц измерения выбрана так, чтобы они не менялись, то постоянство безразмерной константы тонкой структуры будет эквивалентно постоянству элементарного заряда — заряда электрона. Именно в этом смысле я и говорю о постоянстве заряда.) Энергия, содержащаяся в электрическом поле вокруг атомного ядра, пропорциональна квадрату заряда ядра. Такой электростатический вклад в полную энергию атома непропорционально велик для атомов с большим зарядом ядер. Как показывают дальнейшие рассуждения, из принстонского варианта опыта Этвеша следует, что можно допустить лишь очень малые изменения элементарного заряда с высотой, и в разумной теории можно принять, что заметные изменения заряда как в пространстве, так и во времени исключены.

Скалярное поле ϕ в скалярно-тензорной теории тяготения [6] зависит от расстояния до массивного тела, причем его относительный рост, обусловленный присутствием этого тела, равен

$$\frac{\delta\phi}{\phi} = -\frac{GM}{(\omega + 2) R c^2}, \quad (5)$$

где M — масса тела, R — расстояние от него, а ω — безразмерная постоянная, приблизительно равная 5.

Электростатическая энергия атома золота составляет $4 \cdot 10^{-3}$ его полной энергии, тогда как для алюминия это отношение равно всего лишь $4 \cdot 10^{-4}$. Поэтому для золота аномальное гравитационное ускорение должно быть больше. Из уравнения (3) найдем разность таких ускорений ($\delta g = g_{\text{Au}} - g_{\text{Al}}$):

$$\delta g = 3,6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{c}{e} \right)^2 \frac{de^2}{dh}. \quad (6)$$

Из неравенства (4) следует

$$\frac{1}{e^2} \left| \frac{de^2}{dh} \right| < \frac{2 \cdot 10^{-11}}{3,6 \cdot 10^{-3}} \frac{g}{c^2}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{e^2} \left| \phi \frac{de^2}{d\phi} \right| \cdot \left| \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dh} \right| < 5,5 \cdot 10^{-9} \frac{g}{c^2}. \quad (8)$$

Уравнение (5) дает

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dR} = - \frac{GM}{(\omega + 2) R^2 c^2} = - \frac{g}{(\omega + 2) c^2}, \quad (9)$$

откуда при учете (8) для $\omega = 5$ получим

$$\left| \frac{\varphi}{e^2} \frac{de^2}{d\varphi} \right| < 5,5 \cdot 10^{-9} (\omega + 2) \approx 4 \cdot 10^{-8}. \quad (10)$$

Неравенство (10) показывает, что элементарный заряд не может существенно зависеть от скалярного поля скалярно-тензорной теории тяготения при справедливости принятых нами предположений. Ограничения, накладываемые неравенством (10), допускают его изменения лишь в миллион раз меньше, чем было бы естественно ожидать при наличии связи заряда электрона со скалярным полем. Мы приходим к выводу, что элементарный заряд, по всей вероятности, не зависит от скалярного гравитационного поля.

На основании неравенства (10) можно также установить жесткие ограничения для возможной переменности элементарного заряда e со временем. В скалярно-тензорной теории тяготения скалярное поле медленно растет со временем [6]. Для Вселенной, характеризуемой плоским в космологических масштабах пространством и беспредельно расширяющейся с постоянным и непрерывным замедлением скорости расширения, относительный рост скалярного поля выражается как

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2}{(3\omega + 4)T}, \quad (11)$$

где T — возраст Вселенной. (Обычно полагают, что пространство Вселенной не отличается радикально от плоского.) Перемножая неравенство (10) и уравнение (11) и принимая $T \approx 7 \cdot 10^9$ лет, получим

$$\left| \frac{1}{e^2} \frac{de^2}{dt} \right| < \frac{1,1 \cdot 10^{-8}}{T} \frac{\omega + 2}{3\omega + 4} \approx 10^{-19} \text{ лет}^{-1}. \quad (12)$$

Такая скорость изменения пренебрежимо мала.

Анализ вопроса о постоянстве заряда электрона, основывающийся на опыте Этвеша, приводит к более точным

результатам, чем менее косвенные рассуждения, например, рассматривающие радиоактивный распад в прошлые времена [17].

Итак, проведенный анализ, исходящий из отрицательного результата опыта Этвеша и надежно проверенных принципов эквивалентности массы и энергии и закона сохранения энергии, позволяет заключить, что если элементарный заряд и меняется от точки к точке в пространстве, то очень мало. Такая переменность (если бы она существовала) объяснялась бы связью со скалярным полем, аналогичным скалярному гравитационному полю. Однако соотношение между изменениями этого поля во времени и в пространстве накладывает ограничения на возможную переменность заряда электрона и во времени. В обоих случаях переменность пренебрежимо мала, и нужно признать неправдоподобной хоть сколько-нибудь существенную переменность заряда электрона как во времени, так и в пространстве.

С помощью аналогичных рассуждений исключается возможность изменения ряда других безразмерных физических постоянных, таких, как отношения масс элементарных частиц и константа сильного взаимодействия, ответственная за устойчивость атомного ядра. Как видно, сильный принцип эквивалентности в значительной степени подтверждается опытом Этвеша. Однако остаются неподтвержденными два важных элемента этого принципа — постоянство константы слабого взаимодействия и постоянство гравитационной постоянной. Мы посвятим конец сегодняшней беседы этому последнему вопросу.

Для обычного лабораторного сферического груза отношение гравитационной и полной энергий равно

$$\frac{3}{5} \frac{GM}{Rc^2} \approx 10^{-27}, \quad (13)$$

т. е. пренебрежимо мало. Поэтому вопрос о переменности «постоянной» гравитационного взаимодействия в пространстве не может быть решен обычным лабораторным опытом Этвеша. Но такая переменность — главное следствие скалярно-тензорной теории тяготения.

Что можно также сказать об опыте Этвеша в астрономических, а не лабораторных масштабах? Было высказано предположение [18], что когда-нибудь удастся измерить

аномалию в движении планеты Юпитер, связанную с изменением ее собственной гравитационной энергии. Нордтведт [19] предложил использовать группу астероидов Троянцев для наблюдения аномалий в ускорении Юпитера.

Аналогичным образом аномальное ускорение Земли в направлении Солнца должно оказывать небольшое влияние на 24-часовую периодичность приливов в Земле, которое можно было бы измерять с помощью чувствительного гравиметра. Малый груз в гравиметре падал бы на Солнце, не испытывая такого аномального ускорения. Такой эффект исследовался лет пять назад, причем пришли к выводу, что малые поправки к 24-часовому периоду были бы полностью замаскированы другими непредсказуемыми эффектами. Нордтведт [19] предложил использовать в качестве тела сравнения Луну. Согласно скалярно-тензорной теории, орбита Луны должна быть слегка сдвинута вдоль прямой Солнце — Земля. Сдвиг этот мал, но может быть измерен оптическими методами определения расстояния [20]. Угловой отражатель мог бы служить фиксированной точкой на поверхности Луны, а для измерения расстояния можно использовать лазерные импульсы [12].

Согласно скалярно-тензорной теории тяготения, аномалия гравитационного ускорения, вызванная изменением собственной гравитационной энергии, дается уравнением (3), где следует отбросить индекс у E . Теперь E есть полная собственная энергия пробного тела. Из уравнений (3) и (9) получаем [1, 14]:

$$\delta g = \frac{c^2}{E} \varphi \frac{dE}{d\varphi} \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dR} = - \frac{g}{\omega + 2} \frac{\varphi}{E} \frac{dE}{d\varphi}. \quad (14)$$

Нордтведт подошел к той же задаче с другой стороны, исходя из уравнений движения [22].

В скалярно-тензорной теории гравитационная постоянная изменяется обратно пропорционально скаляру φ . Тогда для астрономического объекта, гравитационным сжатием которого можно пренебречь, относительная аномалия гравитационного ускорения составляет

$$\frac{\delta g}{g} = \frac{1}{\omega + 2} \frac{E_g}{E}. \quad (15)$$

Здесь E_g — гравитационная энергия объекта (отрицательная). Для Земли относительное изменение радиуса соответствует примерно $1/10$ относительного изменения ϕ . Поэтому

$$\frac{\delta g}{g} \approx \frac{0,9}{\omega + 2} \frac{E_g}{E}. \quad (16)$$

Для объекта типа Солнца, равновесие которого поддерживается давлением раскаленного газа изнутри, полная (положительная) энергия связи равна половине абсолютной величины отрицательной гравитационной энергии, так что

$$\frac{\delta g}{g} \approx \frac{0,5}{\omega + 2} \frac{E_g}{E}. \quad (17)$$

В обоих случаях аномалия отрицательна, т. е. гравитационное ускорение снижается.

Каков же главный вывод? История, уходящая корнями в древность и продолжающаяся в наше время, должна содержать какую-то истину, но я не обнаружил ее! Возможно, она состоит в том, что удивительно простой опыт, проведенный с достаточной точностью, может дать важные результаты. Может быть, за простыми наблюдениями скрываются глубокие выводы. Наконец, может быть, что физику следует быть дерзким, и если обычный лабораторный прибор слишком мал, чтобы выявить слабый эффект, нужно покинуть лабораторию и взять в качестве прибора Землю, Солнечную систему, Галактику или всю Вселенную.

Мы отметили, что измерение сил гравитации — слабейшего из всех известных взаимодействий — требует приборов, не уместяющихся в лаборатории. Принстонский вариант опыта Этвеша, в котором в качестве источника гравитационного поля было взято Солнце, подтвердил справедливость «слабого» принципа эквивалентности и большей части «сильного» принципа. Однако остается неподтвержденной как раз та часть «сильного» принципа эквивалентности, в которой сосредоточено различие между общей теорией относительности и скалярно-тензорной теорией тяготения. Тот вариант опыта Этвеша, который еще предстоит провести, взяв в качестве пробных частиц объекты астро-

номических размеров, сможет выявить различие, но об этом еще рано говорить.

ЛИТЕРАТУРА К ПЕРВОЙ ЛЕКЦИИ

1. R. H. Dicke, The Theoretical Significance of Experimental Relativity, N. Y., Gordon and Breach, 1964.
2. A. Einstein, Ann. d. Phys., 49, 769 (1916). (Русский перевод: А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, изд-во «Наука», М., 1965, стр. 452).
3. R. v. Eötvös, D. Pekár, E. Fekete, Ann. d. Phys., 68, 11 (1922).
4. A. Einstein, Autobiographical Notes, Albert Einstein, Philosopher-Scientist, P.A. Schilpp, ed., N. Y., Tudor Publ., 1949. (Русский перевод: А. Эйнштейн, Автобиографические заметки, Собрание научных трудов, т. IV, изд-во «Наука», М., 1967, стр. 259.)
5. P. Jordan, Astr. Nachr., 276 (1948); Schwerkraft und Weltall, Braunschweig, Vieweg, 1955; Zs. Phys., 157, 112 (1959).
6. C. Brans, R. H. Dicke, Phys. Rev., 124, 925 (1961); R. H. Dicke, Phys. Rev., 125, 2163 (1962).
7. R. H. Dicke, H. M. Goldenberg, Phys. Rev. Letters, 18, 313 (1967).
8. R. H. Dicke, Gravitation and Relativity, H. Y. Chiu and W. F. Hoffmann, eds., N. Y., Benjamin, 1964. (Русский перевод: Гравитация и относительность, под ред. Х. Цю и В. Гоффмана, изд-во «Мир», М., 1965, стр. 49, 224, 251, 388).
9. R. v. Eötvös, Gesammelte Arbeiten, P. Selenyi, ed., Budapest, Akad. Kiado, 1953.
10. F. W. Bessel, Pogg. Ann., 25, 401 (1832).
11. P. G. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke, Ann. of Phys., 26, 442 (1964).
12. R. H. Dicke, Science, 129, 621 (1959).
13. A. H. Wapstra, G. J. Nijgh, Physica, 21, 796 (1955).
14. R. H. Dicke, Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica „Enrico Fermi“, XX Corso. C. Møller, ed., N. Y., Academic Press, 1961.
15. J. Brault, Dissertation, Dept. of Physics, Princeton University, 1962.
16. R. V. Pound, G. A. Rebka, Phys. Rev. Letters, 4, 337 (1960). (Русский перевод: сб. «Новейшие проблемы гравитации», изд-во «Мир», М., 1961, стр. 474.)
17. R. V. Pound, R. L. Snider, Phys. Rev., 140, B788 (1965).
18. P. J. E. Peebles, R. H. Dicke, Phys. Rev., 128, 2006 (1962).
19. R. H. Dicke, Gravitation and Relativity, H. Y. Chiu and W. F. Hoffmann, eds., N. Y., Benjamin, 1964, Append. A, Chap. 1. (Русский перевод: Гравитация и относительность, под ред. Х. Цю и В. Гоффмана, изд-во «Мир», М., 1965, стр. 70.)

19. K. Nordtvedt, Jr., Phys. Rev., 169, 1014 (1968); Phys. Rev., 170, 1186 (1968).
20. W. F. Hoffmann, R. Krotkov, R. H. Dicke, I. R. E. Trans. on Mil. Electr. MIL-4, 1960, p. 28;
R. H. Dicke, W. F. Hoffmann, R. Krotkov, Space Research II, H. C. van de Hulst, C. de Jager, A. F. Moore, eds., Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1961.
21. C. O. Alley, P. L. Bender, R. H. Dicke, J. E. Faller, P. A. Franken, H. H. Plotkin, D. T. Wilkinson, Journ. Geophys. Res., 70, 2267 (1965).
22. K. Nordtvedt, Phys. Rev., 169, 1017 (1968).

II. СПЛЮСНУТОСТЬ СОЛНЦА И ГРАВИТАЦИЯ

В предыдущей лекции я уже подчеркивал, что гравитационное взаимодействие является исключительно слабым и для проведения с ним фундаментальных экспериментов требуется привлекать в качестве источников поля тяготения астрономические объекты. Мы разобрали опыт Этвеша — один из тех чрезвычайно прецизионных отрицательных экспериментов, которые легли в основу наблюдательного подтверждения теории тяготения. Сегодня я перейду к другому классу наблюдений — к так называемой «положительной проверке общей теории относительности». Этих наблюдений очень немного и точность их относительно невелика, но они играют очень важную роль. Они позволяют судить о том, справедлива ли общая теория относительности или предпочтение следует отдать скалярно-тензорной теории тяготения.

Пожалуй, самой известной из «положительных проверок общей теории относительности» является эффект *гравитационного красного смещения*, о котором мы говорили на прошлой лекции. Хотя сам опыт и дает здесь положительный результат, он, строго говоря, не может служить «положительной проверкой» именно общей теории относительности. Дело в том, что такой же эффект предсказывается и скалярно-тензорной теорией тяготения, да и вообще он выводится из простых соображений, не требующих привлечения аппарата теории гравитации во всей его полноте.

Сейчас известно всего два наблюдения, пригодных для проверки собственно общей теории относительности, и оба они рассмотрены в основополагающей работе Эйнштейна по этой теории [1]. Первый из этих эффектов — отклонение лучей света гравитационным полем — впервые наблюдался в 1919 г. [2], три года спустя после опубликования работы Эйнштейна.

Классический способ наблюдения эффекта отклонения лучей света гравитационным полем требует полного солнечного затмения. В течение нескольких секунд (во время фазы полного затмения) закрытый Луной диск Солнца фотографируется на фоне звездного неба, и положения этих звезд тщательно измеряются на проявленной пластинке.

Так как полное затмение быстро кончается и повторные наблюдения невозможны, всегда вероятны систематические ошибки в конечных результатах наблюдения. К тому же данные, полученные при последних солнечных затмениях (рис. 12), имеют значительный разброс. Поэтому точность измерения отклонения лучей света гравитационным полем при полных солнечных затмениях, видимо, не превышает 20%.

Недавно было предложено несколько новых методов, которые, как можно надеяться, намного улучшат положение.

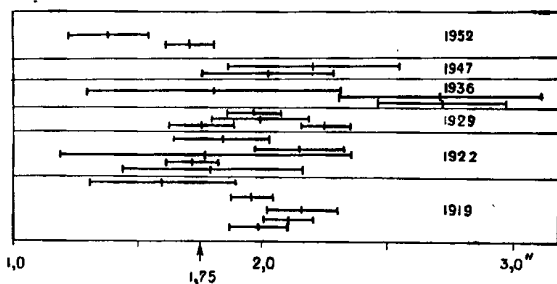


Рис. 12. Отклонение лучей света гравитационным полем. Эйнштейн предсказывал, что лучи света, проходящие непосредственно у края солнечного диска, должны отклоняться на $1,75''$. Приведенные здесь данные получены при анализе фотографий полных солнечных затмений.

ние. Первый из них разработан Шапиро [3] и основан на эффекте запаздывания электромагнитной волны из-за ее отклонения, что позволяет косвенно измерять величину последнего. Наблюдения проводятся при этом с помощью радиолокатора, посылающего сигналы к Венере и Меркурию, когда те находятся почти за диском Солнца. Наблюдается задержка сигнала, прошедшего вблизи поверхности Солнца. Мы располагаем пока только предварительными результатами, но и они уже существенно лучше, чем классические наблюдения.

В другом многообещающем эксперименте используется метод, разработанный Хиллом. В нем с помощью специального инструмента наблюдаются звезды вблизи диска

Солнца, когда нет никакого затмения. Инструмент еще не вполне готов, но можно надеяться, что он позволит проводить регулярные и непрерывные наблюдения, разобраться в трудностях, связанных с систематическими ошибками, и устранить их.

Возможен еще один подход. Он основан на использовании радиоинтерферометра с большой базой для измерения положения космических источников радиоизлучения, когда Солнце проходит вблизи них [3]. Как это ни удивительно, измерения в диапазоне волн, которые в 10^4 — 10^5 раз длиннее волн оптического излучения, дают большее разрешение и точнее определяют угловые положения объектов, чем измерения в оптическом диапазоне.

Согласно скалярно-тензорной теории тяготения [4], ожидаемая величина отклонения луча составляет $(1-s) \times \chi$ (значение Эйнштейна), где $s=1/(2\phi+4)$ представляет собой относительный вклад скалярного взаимодействия в вес тела [5]. Если принять $\omega=5$ в соответствии с обсуждаемой ниже наблюдаемой степенью сжатия Солнца, то предсказываемое отклонение составит 93% эйнштейновского значения.

Отклонение лучей света гравитационным полем — важный гравитационный эффект, позволяющий сделать выбор между обычной общей теорией относительности и скалярно-тензорной теорией тяготения, хотя сейчас проблема такого выбора для нас не главная. Другая — и последняя — «положительная проверка», проводившаяся до настоящего времени, не есть, собственно говоря, предсказание Эйнштейна, хотя он и был первым, кто дал правдоподобное объяснение соответствующему эффекту. Еще с начала XIX в. были известны расхождения между действительным движением планеты Меркурий и теоретически вычисленным согласно ньютоновской теории тяготения. Этот эффект представляет собой дополнительное смещение перигелия орбиты Меркурия на $43''$ в столетие [6], и его причины усиленно искали в прошлом веке (рис. 13). Со времен Ньютона было известно, что планеты должны двигаться по приблизительно эллиптическим орбитам вокруг Солнца, причем вследствие их гравитационных взаимодействий с другими планетами большая ось эллипса должна медленно поворачиваться в направлении движения планеты. Бли-

жайшая к Солнцу точка орбиты называется перигелием, и такой поворот большой оси обычно называют смещением перигелия.

В случае Меркурия эллипс его орбиты поворачивается на $278''$ в столетие из-за гравитационного притяжения только со стороны Венеры; подобным же образом гравитационное взаимодействие Меркурия с Землей добавляет к смещению перигелия Меркурия еще около $90''$ в столетие.

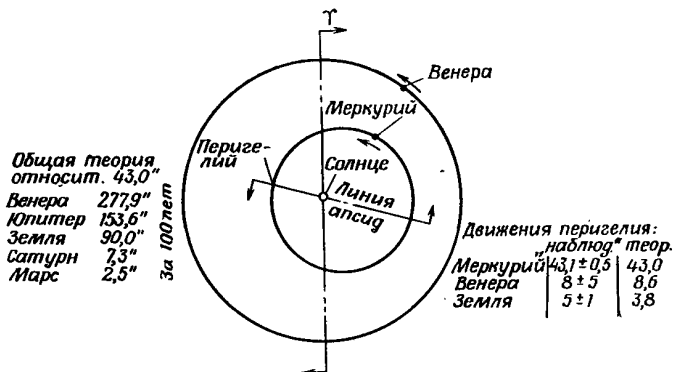


Рис. 13. Смещение перигелия орбиты Меркурия. Слева даны величины вкладов в этот эффект, имеющих разное происхождение. Полное движение перигелия орбиты Меркурия составляет $\sim 5600''$ за 100 лет; из них $\sim 5026''$ имеют геометрическое происхождение, а $\sim 575''$ — динамическое.

Полный же эффект смещения перигелия Меркурия из-за гравитационного взаимодействия Меркурия со всеми остальными планетами составляет приблизительно $530''$ в столетие, т. е. он более чем в 10 раз превышает интересующий нас эффект теории относительности. Этот релятивистский эффект очень мал по сравнению с влиянием планетных возмущений, которые рассчитаны с такой высокой точностью, а сами наблюдения проведены так прецизионно, что избыток в $43''$ в столетие известен с хорошей точностью, достигающей, вероятно, $1''$.

В XIX в. было вполне естественным искать другие небесные тела — источники гравитационного поля, которые могли бы вызвать избыточное движение перигелия орбиты.

В одной из гипотез, объясняющих это смещение, фигурировала неизвестная планета Вулкан, якобы расположенная ближе к Солнцу, чем Меркурий [7]. Она все еще не открыта, и на это мало надежды. Рассуждая аналогичным образом, астрономы пытались объяснить эффект смещения перигелия действием гравитационных полей космической пыли, газа и метеорных тел, но безуспешно.

В наши дни представляется разумным лишь одно из объяснений, предлагавшихся в XIX в.: в смещение перигелия могла бы внести вклад несферическая форма Солнца. Сплюснутость Солнца вызвала бы искажение его гравитационного поля, что в свою очередь обусловило бы смещение перигелия планеты. Хотя в XIX в. речь и шла о такой возможности, мы знаем теперь, что весь эффект (поворот на $43''$ в столетие) объяснить таким образом нельзя.

Несферичность Солнца сказала бы не только на перигелии орбиты Меркурия — прежде всего, она привела бы к медленному уменьшению ее наклона, и этот эффект был бы достаточно велик ($2,3''$ в столетие), если бы все смещение перигелия, т. е. $43''$ в столетие, объяснялось несферичностью Солнца.

Согласно общей теории относительности, все наблюдаемое дополнительное смещение перигелия Меркурия представляет собой проявление релятивистского эффекта, тогда как, согласно скалярно-тензорной теории тяготения, следовало бы ожидать [4] меньшего релятивистского эффекта, а именно:

$$\left(1 - \frac{4}{3} s\right) \times (\text{значение Эйнштейна}) = 0,91 \times$$

$$\times (\text{значение Эйнштейна}) = 39'' \text{ в столетие,}$$

если принять $\omega = 5$. До того, как удалось обнаружить сплюснутость Солнца путем наблюдений, существовали лишь грубые методы оценки величины ω , дававшие ее значения в интервале между 4 и 8 [8].

Если скалярно-тензорная теория тяготения справедлива, придется признать, что часть дополнительного смещения перигелия Меркурия — возможно, $2''$ — $4''$ в столетие — есть следствие нерелятивистского эффекта — обычное ньютоновское возмущение орбиты. Мы покажем правдоподобность того, что причиной таких возмущений

(дающих около $4''$ в столетие) является несферичность Солнца. Этот эффект смещения перигелия должен тогда сопровождаться уменьшением наклона орбиты Меркурия со скоростью $0,21''$ в столетие [9]. Сравните это значение с соответствующей наблюдаемой величиной $0,12'' \pm \pm 0,16''$ в столетие [11].

Сегодня мы займемся Солнцем. Сферично ли оно, а если нет, то насколько? Если внутри Солнца распределение масс

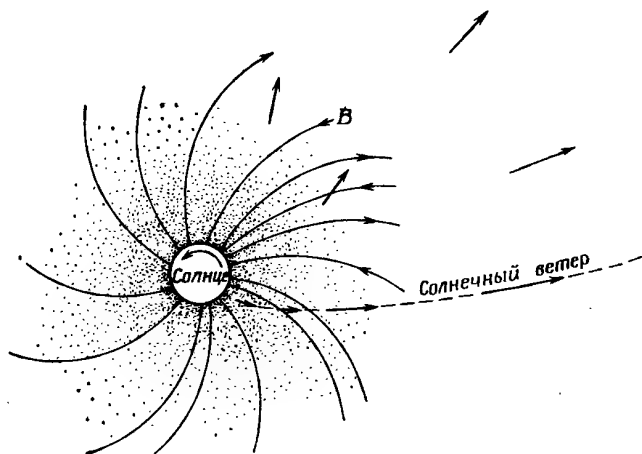


Рис. 14. Вращательный момент, вызываемый солнечным ветром. Момент, действующий на поверхность Солнца, обусловлен искривлением магнитных силовых линий.

несферично, то в чем кроется его причина? Можно ли разумно объяснить некоторую несферичность, базируясь на происхождении Солнца?

Из соображений гидростатического равновесия следует, что Солнце — огромный шар раскаленных газов — должно быть идеально сферическим, если все внутренние напряжения в нем обусловлены давлением газов. Магнитные поля и поля скоростей, естественно, вызывают напряжения, способные исказить форму Солнца. Хотя и невозможно исключить влияния очень сильных и глубоко погруженных магнитных полей, необходимые для создания дефор-

магии значения напряженности чрезвычайно велики, и можно думать, что столь сильные поля должны проникать на поверхность Солнца. Однако поля скоростей, вызванные быстрым вращением глубоких недр Солнца, представляют-ся намного более правдоподобным источником деформирующих напряжений [9].

Быстрое вращение привело бы к сплюснутому распределению массы, которая почти полностью сосредоточена в объеме с радиусом, составляющим 70% радиуса Солнца. Но чего ради должно быть так, что поверхность Солнца вращается медленно (один оборот за 27 дней), а недра — быстро (один оборот за 2 дня)? При определенных условиях медленное вращение поверхности при быстром вращении недр могло бы вызываться магнитным «тормозом», действующим на поверхности. Существование такого магнитного тормоза, приложенного к Солнцу со стороны солнечного ветра, теперь почти общепризнано, хотя в дни, когда я писал свою первую заметку о сплюснутости Солнца [9], положение было неясным (рис. 14). Мы с Пиблсом развили теорию, согласно которой солнечный ветер является источником момента вращения, однако у нас не было точных данных. Количественные оценки проводились еще до того, как была измерена напряженность магнитного поля в солнечном ветре, и была взята грубая оценка этой напряженности, основанная на измерениях магнитного поля у поверхности Солнца [9]. Любопытно, что эта оценка впоследствии оказалась довольно удачной, и данные современных измерений приводят к моменту вращения, лишь слабо отличающемуся от полученного в наших первоначальных расчетах. Позднее и другие авторы [10] независимо создали аналогичные теории момента вращения, вызванного солнечным ветром.

Возможно, что Солнце, как и быстро вращающиеся звезды, образовалось путем конденсации гигантского турбулентного газового облака. Момент количества движения турбулентного газа мог бы передаваться звездам, образовавшимся из него, и обусловить их вращение.

Быстрое вращение отмечено у звезд с массами, превышающими 1,6 массы Солнца. Такие звезды являются более голубыми, чем Солнце, а их поверхностные температуры выше 6500 К. У более красных звезд вращение обычно не

наблюдается, хотя оно отмечено у очень молодых красных звезд.

Очень любопытное объяснение различного вращения голубых и красных звезд предложено Крафтом [11]. Согласно теории звездных атмосфер, звезды с температурой поверхности ниже 6500 К имеют протяженный конвективный поверхностный слой. Такая конвективная зона турбулентна из-за конвективного теплового потока, идущего из недр к поверхности звезды, и это непрерывное «кипение» поверхностных слоев вызывает излучение акустических волн в верхние слои звездной атмосферы, нагревая ее. В свою очередь из-за непрерывного подогрева верхней атмосферы она «испаряется» в пространство и вызывает образование звездного ветра. Описанная картина аналогична наблюдаемой на Солнце. Можно думать, что звездный ветер, взаимодействуя с красной звездой, стремится затормозить вращение ее поверхности, так как при закручивании магнитного поля, вмороженного в плазму ветра, возникает момент вращения. Считается, что у голубых звезд нет такого конвективного слоя, а поэтому нет ни звездного ветра, ни действующего на поверхность момента вращения [11].

Исследуя звездные скопления, Крафт показал, что красные звезды, принадлежащие молодым скоплениям, вращаются, и чем моложе скопление, тем быстрее вращаются эти звезды [12]. Такое замедление вращения красных звезд превосходно согласуется с гипотезой о моменте вращения, действующем на поверхность звезды и сравнимом с известной величиной момента, вызываемого солнечным ветром, если тормозятся лишь поверхностные слои, а не вся звезда в целом. Чтобы вращение всей звезды в целом существенно замедлилось, требуется момент в 50 раз больше.

При определенных условиях внутренняя часть Солнца могла бы вращаться быстрее, чем поверхностная, — вращаться свободно и без турбулентности, а момент количества движения «просачивался» бы медленно к поверхности в силу внутреннего трения слоев. Солнце так громадно, что этот механизм потери момента количества движения работает сравнительно медленно, и даже слабый момент вращения, приложенный к поверхности звезды, может поддерживать медленное вращение внешних слоев.

Итак, вырисовывается следующая картина: только что образовавшееся Солнце представляло собой быстро вращающийся газовый шар, «испаряющий» солнечный ветер; плазма ветра закручивала магнитные силовые линии, вследствие чего на поверхность Солнца действовал момент вращения, замедляющий вращение внешнего слоя Солнца толщиной в 30% радиуса (рис. 14). При этом внутренняя часть Солнца, видимо, продолжала вращаться быстро (может быть, с периодом 2 дня). По нашим оценкам, внешний слой Солнца был заторможен моментом вращения, действовавшим со стороны солнечного ветра, и приобрел приблизительно свой теперешний период вращения (27 дней), всего за несколько сотен миллионов лет.

Сплюснутость гравитационных эквипотенциальных поверхностей можно было бы без труда обнаружить, если бы на поверхность Солнца практически не действовали возмущающие силы. Легко доказать, что поверхность Солнца по своей форме в точности отражает форму суммарной эквипотенциальной поверхности (суммы гравитационного и центробежного полей) в системе отсчета, скорость вращения которой равна средней угловой скорости вращения солнечной поверхности, при условии, что поля скоростей и магнитные поля на поверхности Солнца достаточно слабы [9], если их рассматривать в этой вращающейся системе. Таким образом, перед нами стоят теперь две задачи. Во-первых, является ли поверхность Солнца слегка сплюснутой? Во-вторых, соответствует ли сплюснутость Солнца (если ответ на первый вопрос окажется положительным) сплюснутости гравитационных эквипотенциальных поверхностей, которая является следствием деформации глубинных недр Солнца? По-моему, на оба эти вопроса следует ответить положительно.

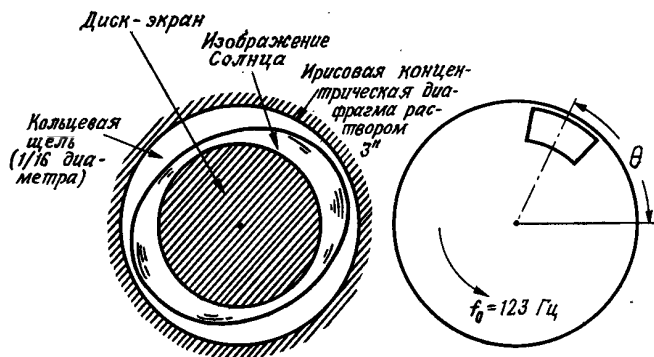
Обратимся к первой задаче — к наблюдению сплюснутости Солнца. Ожидаемая деформация крайне мала: при $\omega = 5$ ее величина составляет всего $(r_{\text{экв}} - r_{\text{пол}})/r_{\text{экв}} = 5 \cdot 10^{-5}$. Такая слабая сплюснутость соответствует разности между экваториальным и полярным радиусами Солнца всего лишь в 35 км. Другими словами, при наблюдении с Земли эти радиусы должны отличаться друг от друга лишь на $0,05''$. К сожалению, Солнце приходится наблюдать днем, когда земная атмосфера очень неспокойна. Из-за

этого изображение Солнца в телескопе размывается примерно на $3''$, что много больше ожидаемого значения $0,05''$. Бесполезно даже прибегать к обычной уловке астрономов, исследующих Солнце, — вставать пораньше, чтобы добраться до телескопа, пока Солнце не поднялось высоко и не нагрело воздух. Дело в том, что нам нужно проводить наблюдения в те немногие часы около полудня, когда Солнце стоит достаточно высоко в небе, чтобы свести к минимуму эффект атмосферной рефракции.

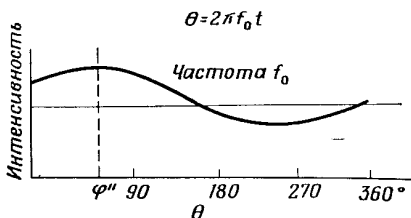
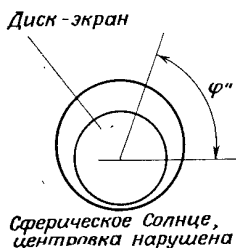
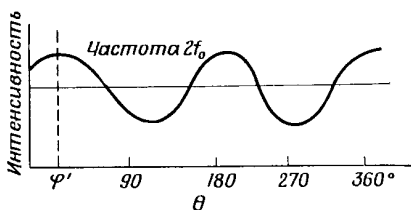
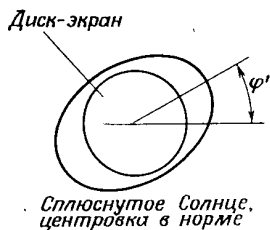
Вместе с коллегами Хиллом и Голденбергом я спроектировал и построил специальный телескоп для наблюдения сплюснутости Солнца. В этом инструменте использована идея, редко применяемая астрономами, однако позволяющая преодолеть большинство трудностей, возникающих при дневных наблюдениях. С помощью нескольких студентов (Стокса, Генри, Дэвиса, Макдоналда и Хоули) мы с Голденбергом провели ряд измерений в летнее время 1966—1969 гг. [13].

Принцип действия нашего инструмента показан на рис. 15. Изображение Солнца проектируется на непрозрачный диск, отсекающий почти весь свет от солнечного диска, за исключением узкого колечка у внешнего края. Этот свет проходит и падает на быстро вращающийся диск с двумя прорезями разных размеров, расположенными на противоположных концах диаметра диска. Эти прорези быстро пробегают по изображению края солнечного диска, что позволяет определить, равномерно ли распределяется световой поток вокруг непрозрачного диска-экрана. Слева на рис. 15 показана схема эксперимента, причем сплюснутость Солнца сильно преувеличена. На рис. 16 приведены кривые изменения светового потока как функции времени для двух случаев — для сплюснутого Солнца и для круглого Солнца при нарушении центровки этого изображения и диска-экрана.

На рис. 17 изображена схема нашей оптической системы [13]. Солнечный луч падает на чрезвычайно плоское первичное кварцевое зеркало, которое соединено с мотором и следует за Солнцем, и отражается на вторичное зеркало. От вторичного зеркала луч отражается вниз вдоль вертикальной оси, проходит через объектив и другие линзы телескопа и дает изображение Солнца на диске-экране, кото-

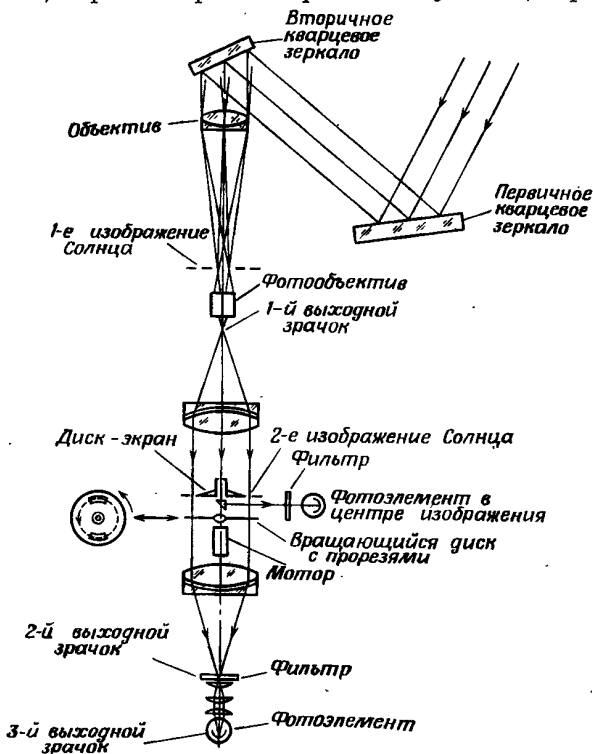


Р и с. 15. Изображение Солнца (сплюснутость сильно преувеличена), частично прикрытое в центре непрозрачным диском-экраном. Справа — упрощенный вид вращающегося диска, который должен находиться за экраном. На диске изображена лишь одна прорезь, хотя на самом деле их две; они расположены на противоположных концах диаметра и несколько различны по величине. Внутренний диаметр диафрагмы $\sim 75 \text{ мм}$.



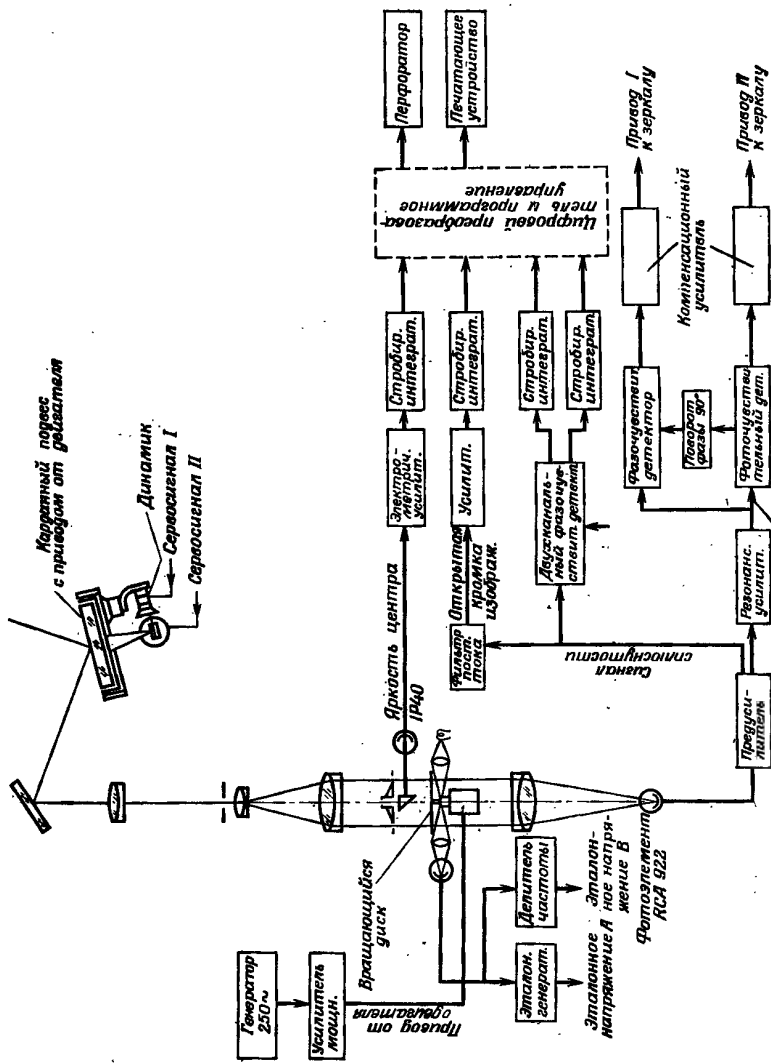
Р и с. 16. Кривые, изображающие зависимость силы тока фотоэлемента от угла (и времени) для случаев сплюснутого изображения Солнца и нарушенной центровки соответственно.

рый изображен непосредственно над мотором, вращающим диск с прорезями. В центре диска-экрана имеется маленькое отверстие, через которое контрольный луч из центра



Р и с. 17. Оптическая схема установки для измерения сплюснутости Солнца. Телескоп — от объектива сверху и до фотоэлемента внизу — установлен строго вертикально и может быть повернут вокруг своей вертикальной оптической оси.

солнечного диска подается на фотоэлемент, следящий за прозрачностью атмосферы. Свет же, минующий край диска-экрана и проходящий через прорези вращающегося диска, фокусируется на втором фотоэлементе. Именно от этого фотоэлемента и поступают данные о центровке и о сплюснутости изображения Солнца.



Данные о центровке изображения Солнца подаются по радиотехнической линии обратной связи на контроль движения первичного зеркала. Этот механизм обратной связи позволяет поддерживать чрезвычайно точную центровку солнечного изображения относительно диска-экрана. Данные о сплюснутости, составляющие другую компоненту сигнала, выделяются также радиотехническим путем, усредняются и регистрируются для дальнейшей обработки (рис. 18).

Вертикальная установка телескопа позволяет исключить систематические ошибки гравитационного происхождения. Весь телескоп — от объектива вверху и до фотозлемента внизу — может быть повернут вокруг вертикальной оси. Обычно данные о сплюснутости изображения Солнца усредняются радиотехническими методами в течение одной минуты, а затем телескоп поворачивается на 90° и та же процедура повторяется в течение следующей минуты. Среднее из этих двух результатов измерений уже свободно от систематической ошибки, возникающей в телескопе. Подобным же образом устраняются ошибки, обусловленные астигматизмом обоих зеркал: эти зеркала ежедневно поворачиваются на 90° вокруг осей, перпендикулярных их поверхностям, причем поворот одного зеркала производится в полдень, а другого — в конце дня. Усредняются равные числа наблюдений, при которых оба зеркала находятся в четырех возможных относительных положениях.

Таким образом устранялись все существенные инструментальные ошибки, кроме одной, связанной с первичным кварцевым зеркалом. Из-за незначительной сферичности этого зеркала возникает эффект внеосевого астигматизма. Так как вторичное зеркало расположено в непосредствен-

Рис. 18. Блок-схема установки, включающая основные электронные блоки, находящиеся во взаимодействии с оптической частью, изображенной на рис. 17. Следует иметь в виду, что сервосигнал на вход первичного зеркала подается с компенсационных усилителей (внизу на схеме), так что соответствующие узлы должны быть соединены. Ток сервосигнала через системы обмоток динамиков приводит к повороту механизма, на котором смонтировано зеркало. Грубое ведение этого зеркала осуществляется с помощью синхронного мотора, тогда как тонкая наводка задается сервоуправлением, поворачивающим систему шарниров.

ной близости от объектива, для него этот эффект мал, и усреднение сводит его к нулю при повороте солнечного изображения относительно вторичного зеркала. Для первичного зеркала эффект внеосевого астигматизма значительнее, а изображение Солнца в нем неподвижно. Этот эффект не поддается устранению, но его можно обойти.

Описанное искажение касается направления север — юг на изображении Солнца. Сплюснутость Солнца может быть выражена как комбинация сокращения его изображения вдоль этого направления и вдоль направления с северо-востока на юго-запад. Последний компонент сплюснутости, называемый диагональным, совершенно не подвержен эффекту внеосевого астигматизма [13].

На рис. 19 показана установка большого первичного кварцевого зеркала, а также установка малого вторичного зеркала. Там же видно отверстие в крыше миниатюрного домика, построенного специально в качестве помещения для инструмента. На рис. 20 видна внутренность этого домика с тремя стойками, заполненными радиотехническим оборудованием, и собственно телескоп в дальней части домика. Мне кажется, что отношение светосилы телескопа к весу электронного оборудования здесь намного меньше, чем у любого другого современного телескопа. Апертура нашего телескопа составляет всего 5 см.

Основная трудность, связанная с турбулентностью атмосферы в дневное время, устраняется тем, что берется полный суммарный световой поток, проходящий мимо диска-экрана и через прорезы вращающегося диска. Нам бы не удалось даже приблизиться к таким результатам, если бы мы пытались непосредственно измерять положение размытого края Солнца. Другим фактором, в значительной мере определившим успех нашего эксперимента, было то, что видимое направление оси вращения Солнца меняется довольно быстро в течение летних месяцев (рис. 21). Дело вовсе не в повороте самой оси вращения Солнца, просто Земля движется по орбите, и мы наблюдаем эту ось с разных позиций. 7 июля ось вращения Солнца ориентирована в направлении север — юг, и как раз в это время ее ориентация меняется быстрее всего.

При усреднении данных по времени наблюдения мы должны получить величину сжатости Солнца вдоль его оси



Р и с. 19. Верхняя часть стационарной установки телескопа; видно отдельно расположенное первичное зеркало. На конце трубы телескопа — вторичное зеркало (на фото видна его оборотная сторона).



Р и с. 20. Внутренний вид павильона, где размещаются телескоп и электронное оборудование. Тонкие стержни, расходящиеся от верхней части трубы телескопа, служат в качестве ручек для ее вращения. Черная щель на трубе — дверца, через которую можно увидеть вторичное зеркало и вращающиеся диски.

вращения. Итак, мы знаем, как должна была бы меняться во времени видимая сплюснутость Солнца. Если бы мы не знали этого заранее, нам было бы очень трудно истолковать наблюдаемый слабый сигнал как следствие сплюснутости Солнца, а не какой-то инструментально-атмосферный эффект. И напротив, ход изменения сигнала в течение лета

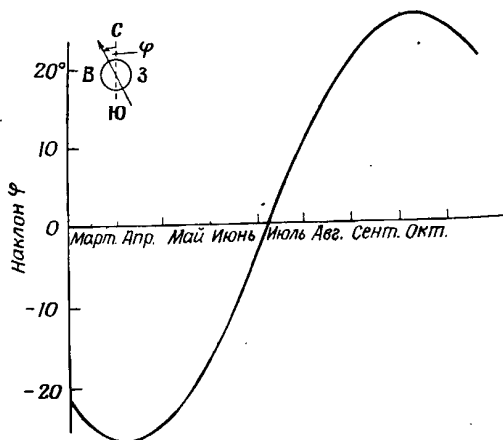


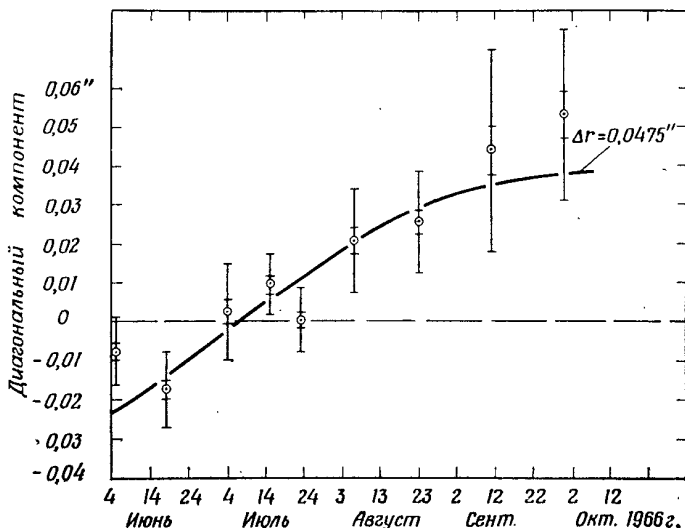
Рис. 21. Изменение наклона оси вращения Солнца.

показал, что направление деформации солнечного изображения совпадает с ориентацией оси вращения Солнца с точностью $1-2^\circ$. Ось, по которой сплюснуто изображение, совпадает с осью вращения Солнца при видимом повороте последней на небе на угол 40° . Я уверен, что этот факт говорит о наблюдении нами именно несферичности Солнца, а не какого-нибудь экзотического инструментального или атмосферного эффекта.

На рис. 21 показана видимая ориентация оси вращения Солнца на небе в течение летних месяцев. В предположении, что сплюснутость составляет $5 \cdot 10^{-5}$, выведен ход ожидаемого изменения диагонального компонента сплюснутости с течением времени. Кривая этого хода приведена на рис. 22 вместе с данными измерений, сделанных в тот же период времени. В сущности, это усредненные значе-

ния результатов, полученных в 1966 г. приблизительно по 10-дневным интервалам между 9 и 16 часами (за середину дня принято время 13 часов).

Наблюдения проводились для трех разных случаев, когда угловые размеры края Солнца, попадавшего за край



Р и с. 22. Диагональный компонент сплюснутости Солнца. Теоретическая кривая вычислена по графику рис. 21, причем сплюснутость Солнца была принята равной $\Delta r/r = 5 \cdot 10^{-5}$, где $\Delta r = r_{\text{экв}} - r_{\text{пол.}}$. Данные по всем увеличениям усреднены за 10 дней с 9 до 16 часов. Средние за 1 час с ошибкой более 0,015'' исключены. За полдень принято время 13 часов. Вертикальные черточки соответствуют ошибкам: 1) среднее квадратическое отклонение одного измерения; 2) среднее квадратическое отклонение среднего.

диска-экрана, равнялись соответственно 19,2'', 12,9'' и 6,3''. Это было сделано для того, чтобы разделить два разных эффекта — влияние изменения яркости вблизи края диска Солнца и влияние собственно сплюснутости Солнца. Хватило бы и двух случаев, но мы взяли три, чтобы показать внутреннюю непротиворечивость метода. Ясно, что совершенно необходимо быть уверенным в происхождении пере-

менного сигнала (рис. 16) от сплюснутости Солнца, а не от изменения яркости солнечного диска с широтой; к тому же знание распределения яркости по диску Солнца требуется и для других целей, к которым я вернусь позднее.

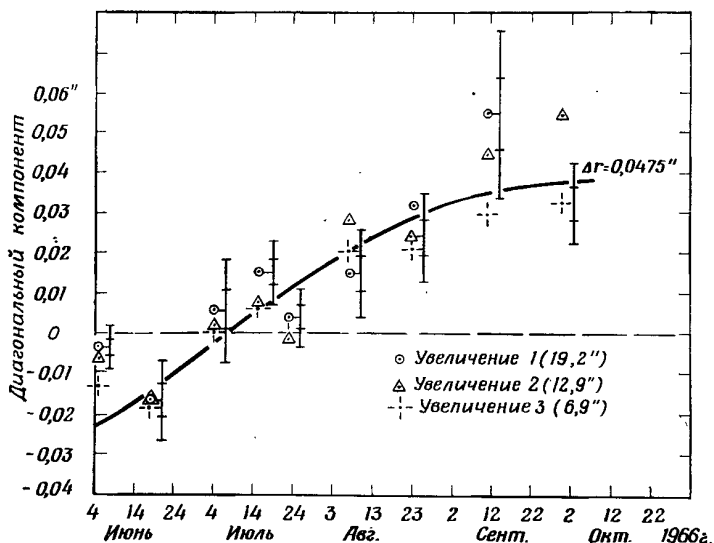


Рис. 23. Разбиение данных, приведенных на рис. 22, на средние по трем различным увеличениям телескопа. Измерения проводились для трех различных величин кромки солнечного диска, выходящей за края диска-экрана. Такие наблюдения при трех угловых размерах кромки солнечного диска (19,2", 12,9" и 6,3") позволяют разделить сигнал на две части, из которых одна обусловлена сплюснутостью Солнца, а другая — предполагаемым различием в яркости экватора и полюса.

На рис. 22 представлены экспериментальные точки, изображающие средние по всем трем только что указанным значениям, тогда как на рис. 23 эти три случая представлены самостоятельно, разными точками. Подобным же образом на рис. 24 результаты разбиты по утренним и вечерним часам наблюдения. Данные, приведенные на этом последнем рисунке, могут служить и для проверки

возможного эффекта, связанного с положением Солнца над горизонтом для Принстона, где проводились наблюдения.

Итак, рис. 22—24 иллюстрируют разносторонний анализ данных, полученных в 1966 г. [13]. Данные, полученные годом позже, согласуются с данными 1966 г. Общий вывод, к которому мы пришли на основе всех этих измерений, состоит в том, что Солнце обладает относительной сплюснутостью $5 \cdot 10^{-5}$, т. е. что его экваториальный радиус

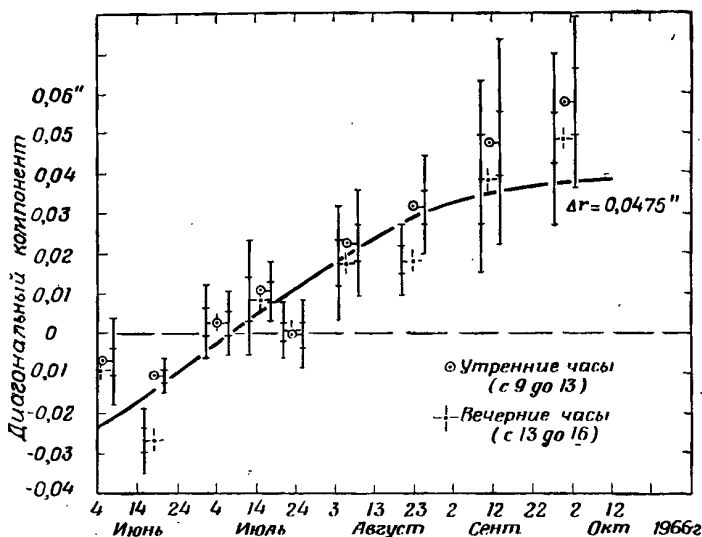


Рис. 24. Данные рис. 22, сгруппированные по утренним и вечерним наблюдениям, могут служить для оценки систематической ошибки, связанной с временем наблюдения.

больше полярного радиуса на 50 миллионов долей. Из этих же измерений, а также из проделанных в 1968 г. следует, что средняя яркость Солнца удивительно постоянна по его поверхности. Мы вовсе не пренебрегаем здесь мельчайшими гранулами, солнечными пятнами и факелами, но имеем лишь в виду, что при усреднении по всему сезону невозможно обнаружить различия в яркости между

полюсом и экватором. Это последнее обстоятельство играет важную роль при интерпретации наблюдений.

Как было замечено выше, форма Солнца определяется формой гравитационных эквипотенциальных поверхностей, когда другие поля, действующие на поверхность, пренебрежимо слабы [9]. С другой стороны, известно, что в поверхностных слоях Солнца существуют как магнитные поля, так и поля скоростей, и поэтому нужно выяснить, какова их роль. Деформация поверхностных слоев Солнца, обусловленная существующими там магнитными полями и полями скоростей, обычно сопровождается поверхностными аномалиями температуры. Можно показать, что изменить форму поверхности Солнца, не вызывая появления чрезмерных аномалий температуры, способны лишь весьма узкие классы полей [14]. Поэтому, если принять условие равномерного распределения яркости на поверхности Солнца, остается разрешенным лишь узкий класс полей. Все эти поля были детально исследованы, и мы пришли к выводу о неспособности наблюдаемых на поверхности Солнца полей вызвать сплюснутость, так что действительная сплюснутость Солнца должна быть следствием деформации его глубинной зоны. Как наблюдения, так и их истолкование — дело тонкое, и невозможно быть абсолютно уверенным в полной достоверности заключения, однако я весьма склонен ему доверять. Мне кажется крайне мало правдоподобным, чтобы интерпретация наблюдений оказалась неверной, но совсем другое дело — говорить о связи между сплюснутостью Солнца и структурой его гравитационного поля. Нам не удалось найти правдоподобных распределений полей на поверхности Солнца, которые могли бы вызвать такую деформацию, и я убежден, что наблюдаемая сплюснутость действительно отражает сплюснутость гравитационных эквипотенциальных поверхностей Солнца. Было бы, однако, ошибкой возвести это в догму, так как вопрос крайне сложен.

Ховард, Мур и Спигел [15] выдвинули возражение, сводящееся к тому, что Солнце не может обладать быстро вращающейся сердцевинной, так как момент количества движения быстро распространился бы наружу вследствие передачи момента количества движения потоками Экмана, благодаря которым, например, происходит быстрое замед-

ление вращающейся жидкости в чайной чашке. Я ответил им, что потоки Экмана возбуждаются лишь при функциональной зависимости между давлением и плотностью, чего нет во внутренних областях Солнца [16]. Циркуляционные потоки термического происхождения вообще-то возникают, но эти потоки обычно очень медленны, а их амплитуда зависит от конкретного распределения угловой скорости внутри Солнца.

Гольдрейх и Шуберт [17] привели довод, что быстро вращающаяся сердцевина теряла бы момент количества движения вследствие эффекта, аналогичного известному океанографам эффекту «солевого пальца», представляющему собой нестабильность, которая связана с отделением от быстро вращающейся сердцевины тонких тороидальных колец жидкости, уносящих вверх момент количества движения. Они тщательно разработали этот вопрос, но при этом остались трудности с условиями во внутренней области Солнца. Так, вызывают сомнения предположения об отсутствии меридионального движения, о глубоко погруженном магнитном поле или о неоднородности химического состава зоны дифференциального вращения.

Если принять, что Солнце деформировано в соответствии с данными о его сплюснутости, то можно прийти к ряду заключений. Во-первых, избыточное смещение перигелия, равное примерно $4''$ в столетие, будет вызвано сплюснутостью Солнца. Тогда для релятивистского эффекта остается около $39''$ в столетие, что хорошо согласуется с предсказанием скалярно-тензорной теории тяготения, но противоречит предсказанию общей теории относительности. Следует заметить, что имеется некоторая неопределенность относительно орбиты Меркурия. Наблюдать его трудно, и может оказаться, что связанные с ним ошибки значительнее, чем думают сейчас астрономы. Придет время, и радиолокационные наблюдения планет дадут независимое определение величины смещения перигелия Меркурия.

Второй вывод, к которому можно прийти на основании наблюдаемой сплюснутости Солнца, касается свойств Солнца как вращающейся звезды, если считать верной гипотезу о быстро вращающейся сердцевине. Для голубых звезд Крафт показал, что их момент количества движения про-

порционален массе в степени 1,57 [11]. Если принять, что сердцевина Солнца вращается с периодом 2 дня, момент количества движения Солнца не будет противоречить формуле Крафта. Тогда эту формулу разумно обобщить и распространить на все нормальные звезды главной последовательности, допуская, что в красных звездах момент погребен глубоко в их сердцевине. При этом существенное различие между красными и голубыми звездами нужно искать в звездном ветре, замедляющем вращение поверхности красных звезд.

Что ждет нас в будущем? Прежде всего, в будущем радиолокационные наблюдения планет должны привести к улучшенным независимым измерениям смещения перигелия Меркурия. Эти наблюдения должны также привести к измерению смещения перигелия для Земли и для Марса. Сравнивая данные для нескольких планет, можно было бы исключить влияние сплюснутости Солнца и таким образом непосредственно проверить величину релятивистского эффекта. Возможно также, что новые и независимые определения деформации гравитационного поля Солнца удастся произвести, наблюдая и другие орбитальные эффекты, к которым приводит сплюснутость Солнца, если удастся установить на искусственной планете или астероиде электронную систему. Наконец, следует заметить, что если наши наблюдения будут истолкованы в пользу скалярно-тензорной теории тяготения, а не общей теории относительности, то отклонение лучей света гравитационным полем должно составлять лишь 0,93 эйнштейновского значения. Более тонкие наблюдения с помощью радиолокации планет и другие методы уточнения величины отклонения лучей света могут дать результаты, которые либо подтвердят, либо опровергнут приведенное истолкование наших наблюдений сплюснутости Солнца.

ЛИТЕРАТУРА КО ВТОРОЙ ЛЕКЦИИ

1. A. Einstein, Ann. d. Phys., 49, 769 (1916). (Русский перевод: А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, изд-во «Наука», М., 1965, стр. 452.)
2. F. W. Dyson, A. S. Eddington, G. Davidson, Phil. Trans. Roy. Soc. (London), 220A, 291 (1920).
3. I. I. Shapiro, G. H. Pettigill, M. E. Ash,

- M. L. Stone, W. B. Smith, R. P. Ingalls, R. A. Brockelman, *Phys. Rev. Letters*, **20**, 1265 (1968).
4. C. Brans, R. H. Dicke, *Phys. Rev.*, **124**, 925 (1961).
5. R. H. Dicke, *Phys. Rev.*, **125**, 2163 (1962).
6. G. M. Clemence, *Astr. Papers Amer. Ephem.*, **11**, 1 (1943); *Rev. Mod. Phys.*, **19**, 361 (1947); *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **93**, 532 (1949);
R. L. Duncombe, *Astr. Papers Ephem.*, **16**, 1 (1958);
P. A. Wayman, *Quart. Journ. Roy. Astr. Soc.*, **7**, 138 (1966).
7. J. Chazy, *La théorie de la relativité et la mécanique céleste* Paris, Gauthier-Villars, 1928.
8. R. H. Dicke, *Stellar Evolution*, B. G. Marsden and A.G.W. Cameron, eds., N. Y., Plenum Press, 1966.
9. R. H. Dicke, *Nature*, **202**, 432 (1964).
10. E. J. Weber, L. Davis, Jr., *Astrophys. Journ.*, **148**, 217 (1967);
J. L. Modisette, *Journ. Geophys. Res.*, **72**, 1521 (1967);
A. Alfonso-Faus, *Journ. Geophys. Res.*, **72**, 5576 (1967).
11. R. Kraft, частное сообщение, 1964.
12. R. Kraft, частное сообщение, 1968.
13. R. H. Dicke, H. M. Goldenberg, *Phys. Rev. Letters*, **18**, 313 (1967).
14. R. H. Dicke, в печати.
15. L. N. Howard, D. W. Moore, E. A. Spiegel, *Nature*, **214**, 1297 (1967).
16. R. H. Dicke, *Astrophys. Journ.*, **149**, L121 (1967).
17. P. Goldreich, G. Schubert, *Astrophys. Journ.*, **150**, 571 (1967); **154**, 1005 (1968).

III. КОСМИЧЕСКИЙ «ОГНЕННЫЙ ШАР» И ГРАВИТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В двух предыдущих лекциях я подчеркнул, что гравитационное взаимодействие является чрезвычайно слабым и что для проведения принципиальных экспериментов приходится использовать огромные тела. Источником гравитационного поля в опыте Этвеша, обсуждавшемся в первой лекции, было Солнце, и оно же использовалось при положительной проверке общей теории относительности, обсуждавшейся во второй лекции. Сегодня мы обратимся к наибольшей из возможных динамических систем — ко Вселенной в целом. Здесь протяженности в пространстве и во времени столь велики, что динамика системы определяется главным образом релятивистскими принципами, а не релятивистскими эффектами, играющими роль второстепенных возмущений системы, почти полностью описываемой механикой Ньютона.

Подход ко Вселенной в целом как к прибору — вещь занятая, но проведение экспериментов с таким прибором имеет ограничения. Наблюдатель не может управлять опытом, и опыт не может быть повторен. Более того, в прибор невозможно вносить изменения.

Приборы астрономических размеров требуются не только для исследования тяготения. Ядерные реакции протекают внутри Солнца в таких условиях, которые невозможно воспроизвести в лаборатории, а внутри нейтронных звезд и белых карликов вещество сжато до плотностей, абсолютно недостижимых в лаборатории. Во Вселенной происходят магнетогидродинамические эффекты, в которых участвуют магнитные поля и чрезвычайно разреженный ионизованный газ в таких объемах и в течение таких интервалов времени, что ничего подобного в лаборатории нам не повторить. Для изучения подобных физических явлений исследование астрономических систем становится существенным. Но в случае гравитации — самого слабого из известных взаимодействий — такой астрофизический подход к экспериментальному познанию просто необходим.

Вселенная — слишком сложная система, чтобы ее исследовать дедуктивно, исходя из начальных условий и решая уравнения движения. Гораздо более плодотворный подход — тщательно анализировать наблюдаемые свойства Вселенной, а затем пытаться делать заключения об их природе и эволюции в прошлом.

Что мы видим, выглядывая из своего мира во Вселенную? Кроме планет, Луны и прочих мелких тел Солнечной системы, первым существенным объектом является наше Солнце. Солнце, будучи типичной звездой, содержит в своих наружных слоях кроме водорода круглым числом 25% гелия и 2% других элементов. Излучение Солнца поддерживается превращением в его недрах водорода в гелий при очень высоких температурах. Факт наличия на Солнце кроме водорода и гелия также других элементов очень важен, так как есть основания думать, что эти более тяжелые элементы были синтезированы в прошлом внутри других звезд.

Покинув Солнце и отправившись еще гораздо дальше в космос, на расстояния, более чем в 100 000 раз превышающие расстояние от Солнца до Земли, мы начнем встречать и другие солнцеподобные объекты — звезды. Они попадают иногда целыми скоплениями — гравитационно связанными системами, такими, как известные всем Плеяды, а множество очень слабых, а значит, и очень далеких звезд образует огромный пояс вокруг всего неба — Млечный Путь. Эта последняя система наводит на мысль об удивительнейшей тенденции в распределении звезд, а именно стремлении собираться в уплощенные дискообразные системы. Именно таким диском, видимым с ребра, и является наш Млечный Путь. Тщательное исследование его структуры, особенно при помощи радиотелескопов, показало, что он обладает формой уплощенной спирали и подобен давно известным спиральным туманностям, во множестве наблюдаемым на небе. Этот диск — Галактика, гравитационно связанная система звезд. Известно, что диаметр Галактики составляет приблизительно 25 кпс, т. е. $7,5 \cdot 10^{22}$ см или 5 миллиардов расстояний от Солнца до Земли. В Галактике примерно 100 миллиардов звезд, а толщина диска на расстоянии Солнца от центра Галактики составляет около 2% его диаметра. В целом диск медленно вращается вокруг

своей оси, причем наружная его часть движется медленнее. Солнцу для оборота вокруг центра Галактики требуется 250 миллионов лет.

Одним из аспектов строения Галактики, не бросающихся в глаза, является существование в ней двух подсистем звезд. Первая подсистема, или население I, включает звезды, составляющие уже описанный диск; вторая же система, или население II, состоит из звезд, сферически распределенных вокруг центра Галактики. Звезды населения II движутся не по круговым орбитам, типичным для членов населения I, а по чрезвычайно вытянутым. Известно, что звезды населения II чрезвычайно стары, и в них мало тяжелых элементов по сравнению с Солнцем. Эти различия в химическом составе и движении имеют важное значение для фундаментального вопроса, связанного с гравитацией, к которому мы еще вернемся.

Возраст звезд определяется из анализа звездных скоплений. Исходя как из наблюдательных, так и из теоретических соображений, полагают, что гравитационно связанные звездные скопления содержат звезды в основном одного и того же возраста, сконденсировавшиеся из газового облака при гравитационном сжатии. Массы звезд различны, и более массивные звезды являются более яркими, причем светимость их возрастает как куб массы (для звезд, более массивных, чем Солнце). Поэтому время жизни такой звезды до момента, пока в центре ее не истощатся запасы водорода, приблизительно обратно пропорционально квадрату массы. Значит, максимальная светимость звезд, в центре которых еще «сжигается» водород, может служить мерой возраста скопления. Трудности при оценке максимальной светимости устраняются, если использовать связь между светимостью и цветом звезды (самые массивные и яркие звезды являются наиболее голубыми). Чтобы оценить их возраст, остается только наблюдать цвет звезд вдоль «главной последовательности» — звезд, «сжигающих» в своих недрах водород [2].

Основной факт, который выясняется при исследовании возраста звезд, состоит в том, что все звезды населения II имеют, видимо, примерно один и тот же возраст, тогда как звезды населения I разбросаны по самым разным возрастам, но моложе звезд населения II. Абсолютные возрасты

звезд не известны, особенно звезд населения II, ввиду неясности их химического состава. В принципе теория звездной эволюции позволяет определить возраст звездных скоплений, если задан химический состав. При разных предположениях о составе возраст звезд населения II лежит в пределах от $9 \cdot 10^9$ до $20 \cdot 10^9$ лет [3], причем более молодые

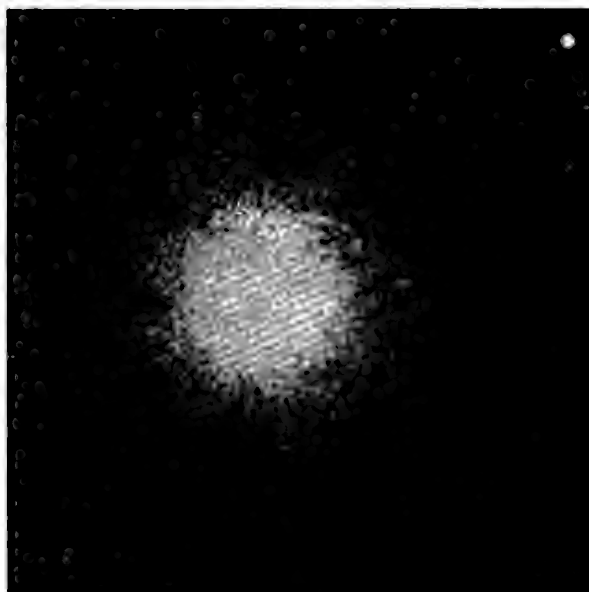


Рис. 25. Шаровое звездное скопление. Некоторые считают, что эти компактные системы, насчитывающие примерно по 10^5 звезд, суть реликтовые остатки первичных газовых облаков, сконденсировавшихся при остывании космического «огненного шара».

звезды содержат больше гелия. Возраст Галактики может быть также определен по скорости радиоактивного распада урана, образовавшегося в Галактике, когда она была молодой [1]. Этот возраст, считающийся одной из самых точных оценок для Вселенной, равен $7 \cdot 10^9$ лет [4]. Мы еще вернемся к третьему способу оценки возраста.

Огромную сферическую совокупность звезд населения II называют еще «гало». Оно содержит приблизительно 100 шаровых звездных скоплений. Они имеют сферическую форму, примерно одни и те же размеры и светимости и содержат приблизительно по 10^5 звезд (рис. 25). Состав и возраст звезд этих скоплений, по-видимому, тот же, что и у одиночных звезд населения II (звездное поле). Мы с Пиблсом считаем, что эти скопления являются реликтовыми остатками первых объектов, сконденсировавшихся из вещества расширяющейся Вселенной. Однако мы еще не говорили об этом расширении, и я перехожу теперь к этому вопросу.

За пределами нашей Галактики мы встречаем много других чрезвычайно больших звездных систем, часто дискообразных, со спиральными ветвями, подобных нашей Галактике.

До проникновения в астрономию фотографических методов не знали, что слабые светлые пятнышки с едва различимой спиральной структурой представляют собой гигантские звездные системы. Даже теперь удается различить в ближайших спиральных туманностях только самые яркие звезды.

Мы знаем теперь, что наша Галактика — это одна из, вероятно, миллиарда подобных ей гравитационно связанных звездных систем во Вселенной. Не все звездные системы являются спиральными галактиками — в некоторых случаях галактики имеют округлую, эллиптическую форму, а иногда состоят из перемычки с отходящими от нее спиральными ветвями. Существуют и крайне неправильные галактики, как знаменитые Магеллановы Облака, видимые в южном полушарии.

Все эти разнообразные галактики разбросаны на разных расстояниях от нас, и на больших расстояниях число их огромно. В отличие от шаровых звездных скоплений для галактик каждого типа не характерно постоянство размеров и светимостей. Массы и светимости галактик могут различаться на 4 порядка по своей величине.

При наблюдении спектров далеких галактик обнаружилось, что спектральные линии в них сдвинулись в красную сторону, что, согласно эффекту Доплера, означает удаление от нас. Это так называемое космологическое красное

смещение оказалось пропорциональным расстоянию до галактики. Такая связь между красным смещением и расстоянием была исследована чрезвычайно тщательно А. Сэндейджем, обнаружившим, что удобнее всего опираться при этом исследовании на скопления галактик. Скоплений галактик на небе множество, и они, видимо, являются гравитационно связанными системами галактик, движущихся внутри них с относительными скоростями порядка 10^3 км/с. По Сэндейджу, самая яркая галактика в скоплении имеет более или менее стандартную светимость. Расстояние до скопления галактик поэтому определяется по видимому блеску наиболее яркого члена скопления. Отсюда и находится связь между расстоянием и красным смещением [5].

Из наблюдений следует, что Вселенная является расширяющейся системой, причем скорость расширения пропорциональна расстоянию от нас. Такая связь между расстоянием и скоростью чрезвычайно важна. В 1929 г. Хаббл обнаружил, что Вселенная расширяется, причем пройденное в ходе расширения расстояние пропорционально скорости разбегания [6]. Если предположить, что скорость убегания галактики не изменяется со временем, то ничего не стоит определить момент, когда эта галактика была совсем близка к нам. Этот момент оказывается одним и тем же для всех галактик; по современным оценкам это было 10—17 миллиардов лет тому назад [5]. Вместе с тем гравитационное притяжение со стороны других галактик стремится замедлить скорость расширения, и есть основания считать, что истинный возраст Вселенной (время, прошедшее с момента «взрыва») равен приблизительно $\frac{2}{3}$ только что приведенного значения, т. е. 6,5—11 миллиардов лет. Следует отметить, что возраст Галактики, найденный из закона радиоактивного распада урана и оцененный в 7 миллиардов лет, согласуется с этой грубой оценкой.

Особенно важной чертой распределения галактик вокруг нас является однородность и изотропность этого распределения. Картина такова, как будто галактики разбросаны вокруг нас равномерно, и эта однородность касается не только их распределения, но и закона возрастания их скоростей по мере удаления от нас. Как это следует истолковать? Напрашивается мысль, что человеку отведено особое, центральное положение во Вселенной, что все галак-

тики разбегаются именно от нас. Другое истолкование утверждает, что Вселенная по своей структуре однородна и все точки в ней равноправны. Тогда Вселенная представляется изотропной при наблюдении из любой галактики, в какой бы ни жил человек. Это последнее истолкование соответствует наблюдениям. Нетрудно мысленно перенестись в любую галактику, далекую от нашей, и учесть при этом то, что нам сегодня известно о распределении галактик и об их движении относительно нас (примем это движение чисто радиальным). Произведя такое простое математическое преобразование, мы приходим к заключению, что в среднем Вселенная одинакова, из какой бы галактики мы ее ни наблюдали. Это заключение соответствует тезису об однородности Вселенной и о том, что человек не занимает в ней какого-то особого, центрального положения.

В целом мы приходим к представлению, что Вселенная была порождена в некой катастрофе и, вероятно, к катастрофе же стремится. Если скорость расширения Вселенной достаточно сильно замедляется, это расширение в один прекрасный день прекратится и сменится сжатием. Результатом его может быть катастрофа, при которой галактики начнут сталкиваться друг с другом, и конец Вселенной окажется тогда подобным ее началу, который нас сегодня в основном интересует.

ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ И РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Как уже говорилось в двух предыдущих лекциях, мы проводим сравнение между двумя релятивистскими теориями тяготения: общей теорией относительности Эйнштейна и другой общерелятивистской теорией, тесно связанной с ней, — скалярно-тензорной теорией. Обе они основываются на римановой геометрии, физическое пространство в которой не обязательно плоское (евклидово). В теории тяготения Эйнштейна гравитационные эффекты связаны с кривизной пространства-времени. Точка зрения скалярно-тензорной теории аналогична, но добавляется скалярное поле, роль которого аналогична роли скалярного гравитационного поля в доэйнштейновской теории тяготения.

В обеих теориях пространство-время можно считать с достаточной степенью точности плоским в тех малых че-

тырехмерных областях, в которых ставится лабораторный опыт. Если в этих малых областях частицы движутся относительно лаборатории достаточно медленно, то ньютоновская динамика в плоском трехмерном абсолютном пространстве достаточна. Для описания быстрых движений требуется частная теория относительности Эйнштейна, четырехмерное пространство-время которой также плоское.

Вселенная, взятая как целое, так огромна, что этот ограниченный подход, основывающийся на рассмотрении практически плоских малых элементов пространства-времени, приемлем только при анализе малого участка Вселенной. Однако вследствие ее однородности любой малый элемент пространства-времени должен быть (в среднем) типичным образцом целого. Образец этот должен быть малым, однако не чересчур. Существенно, чтобы он был достаточно велик и включал много галактик, даже скоплений галактик, иначе было бы невозможно считать заполняющую его материю непрерывной средой.

К счастью, вся Вселенная настолько огромна, что даже этот гигантский «элемент» ее может считаться малым по сравнению с ней самой. Таким образом, мы можем изучать Вселенную в целом, исследуя наш типичный образец, представляющий собой практически плоский элемент пространства-времени.

У теории тяготения Ньютона есть удивительное следствие: повсюду внутри пустой сферической массивной оболочки всякое гравитационное воздействие отсутствует. Интуиция подсказывает, что пробное тело, если его приблизить изнутри к оболочке, должно было бы притягиваться ее ближайшей частью. Однако этого не происходит, так как в этой части вещества намного меньше, чем во всех остальных частях обширной оболочки, и взаимно противоположные силы притяжения в точности компенсируют друг друга. Если бы мы пробурили в однородной сферической Земле радиальную шахту до самого центра, то ускорение брошенной в эту шахту дробины все время уменьшалось бы по мере приближения к центру Земли.

Этот вывод, что гравитационные силы исчезают внутри сферической полости с изотропным распределением масс, сохраняет свою силу и в общей теории относитель-

ности. Внутри такой полости пространство-время должно быть плоским и гравитационных сил нет.

Во Вселенной нет таких огромных сферических полостей, но мы можем их себе представить, мысленно «вычерпав» все галактики из большого (но не слишком большого) сферического объема, а затем вернув их одну за другой назад в получившуюся при этом полость с плоским пространством-временем. Возвращая назад галактики, мы можем выразить их гравитационные взаимодействия в духе закона тяготения Ньютона как притяжение между отдельными галактиками, содержащимися в нашей сферической полости. Такой подход к галактикам, расположенным внутри воображаемой сферической полости и взаимодействующим по закону тяготения друг с другом, но только не с веществом вне этой области, позволяет просто описать расширение Вселенной [7].

Вообразим большой сферический объем пространства и себя в центре. Радиус этой сферы должен быть мал по сравнению с радиусом «видимого мира», но достаточно велик для того, чтобы в ней поместилось очень большое число галактик. На галактику, находящуюся внутри этой области близко к поверхности сферы, действуют силы тяготения, направленные к ее центру, как если бы все вещество этой области было в нем сосредоточено. Тогда результирующее ускорение, действующее на такой пробный объект-галактику в направлении центра сферы, или замедление расширения Вселенной, равно

$$a = \frac{GM}{r^2} = \frac{4\pi}{3} G\rho r, \quad (1)$$

где M — масса, заключенная в сфере, r — радиус последней, ρ — средняя плотность материи во Вселенной, а G — гравитационная постоянная.

Из равномерности расширения Вселенной следует, что радиальная скорость удаления галактики от нас равна

$$v = T_H^{-1} r, \quad (2)$$

где T_H — хаббловский возраст Вселенной, по имени открывателя расширения Вселенной. Величина T_H была бы равна возрасту Вселенной, если бы расширение протекало

с постоянной скоростью. Замедление удобно характеризовать безразмерным параметром замедления

$$\frac{ar}{v^2} = \frac{4\pi}{3} G\rho T_H^2. \quad (3)$$

Поскольку $a = -d^2r/dt^2$ и ρr^3 есть мера количества вещества, содержащегося в сфере и не зависящего от времени, можно проинтегрировать уравнение (1). Мы получим тогда

$$v^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho r^2 + v_0^2, \quad (4)$$

где v_0^2 — постоянная интегрирования. Если эта постоянная положительна, то Вселенная расширяется неограниченно, но если v_0^2 отрицательна, то Вселенная сначала расширяется до своих наибольших размеров, а затем снова сжимается. Если же $v_0^2 = 0$, то Вселенная расширяется беспредельно, однако скорость расширения монотонно убывает.

С грубо-нерелятивистской точки зрения уравнение (4) можно считать выражением закона сохранения энергии. Умножая его на ρ/r и перенося первый член правой части в левую, получим три величины, соответствующие кинетической, потенциальной и полной энергии на единицу объема.

Хотя уравнение (4) было получено в предположении равенства нулю давления (давлением, связанным с беспорядочным движением галактик, пренебрегаем), оно остается справедливым и при наличии давления. Привлекая эйнштейновский принцип эквивалентности массы и энергии, найдем, что в плотность материи ρ должна быть включена тепловая энергия. В реально существующей Вселенной эта энергия, как полагают, присутствует в виде излучения черного тела с температурой 2,7 К. В настоящее время вкладом такой энергии можно пренебрегать, но, как мы увидим далее, этот вклад был весьма существенным в прошлом.

Если во Вселенной присутствует давление, отличное от нуля, то полная энергия, содержащаяся в расширяющейся сфере и определенная выше, не постоянна, так как внут-

ренное давление, действующее на поверхность расширяющейся сферы, совершает работу. Скорость изменения полной энергии, содержащейся в сфере, удовлетворяет тогда уравнению

$$\frac{d}{dt}(\rho c^2 r^3) = -P \frac{d}{dt}(r^3). \quad (5)$$

Если продифференцировать по времени уравнение (4) и подставить в него (5), получим

$$a = \frac{4\pi}{3} G \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right) r. \quad (6)$$

Современное значение средней плотности материи во Вселенной известно плохо. Если принять, что материя представлена лишь видимым веществом (галактиками), то средняя плотность равна примерно $7 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Однако имеются основания полагать, что материя может присутствовать также в визуально наблюдаемой форме, так что полная плотность может приблизительно достигать $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³, что соответствовало бы случаю $v_0^2 = 0$. Тогда уравнение (4) легко интегрируется и при равном нулю давлении дает

$$1 = 6\pi G \rho t^2, \quad (7)$$

причем $r \sim t^{1/2}$. Тогда при равном нулю давлении параметр замедления (3) равен 0,5.

На рис. 26 изображены кривые решений, представляющие r как функцию t для трех разных оценок современной плотности материи и $P=0$, но при одном и том же современном значении хаббловского возраста.

Есть основания полагать (и дальнейшее обсуждение подтвердит это), что плотность материи в молодой Вселенной не была пренебрежимо малой, а, напротив, удовлетворяла соотношению $P = \rho c^2/3$. Это максимально возможное давление для обычного вещества, и оно типично для релятивистских частиц, таких, как электромагнитное излучение (фотоны). В этом случае из уравнения (5) следует, что $\rho r^4 \approx \text{const}$, а уравнение (7) принимает вид

$$1 = \frac{32\pi}{3} G \rho t^2, \quad r \sim t^{1/2}. \quad (8)$$

В скалярно-тензорной теории тяготения скалярное поле оказывается еще более несжимаемым, чем электромагнитное или чем вещество при высоких температурах. Если энергия Вселенной содержится главным образом в скалярном поле, то давление равно $P \approx \rho c^2$. Это — наивысшее

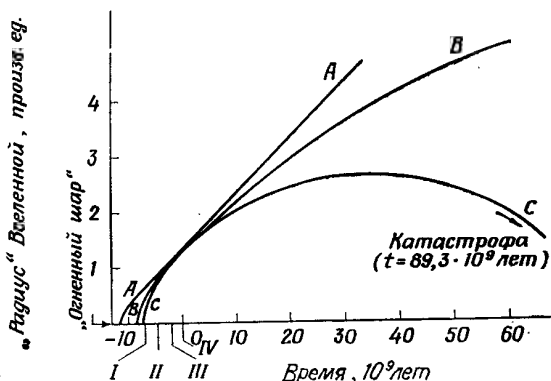


Рис. 26. Космология в традиционной общей теории относительности. «Радиус» Вселенной — это мера расстояния между соседними галактиками. Хаббловский возраст совпадал бы с возрастом Вселенной, если бы ее расширение проходило равномерно (без замедления). При вычислениях принимались современная скорость расширения $7,7 \cdot 10^{-11}$ лет $^{-1}$, хаббловский возраст $13 \cdot 10^9$ лет и три значения современной плотности материи: $7 \cdot 10^{-31}$ г/см 3 (A), $1,75 \cdot 10^{-29}$ г/см 3 (B) и $3,5 \cdot 10^{-29}$ г/см 3 (C). На оси абсцисс стрелками отмечены следующие события: I — образование Галактики, II — образование Солнечной системы, III — эпоха древнейших ископаемых, IV — наше время. События I и II датируются по радиоактивному распаду.

давление, которое допускается теорией относительности. При этом уравнение (7) принимает вид

$$1 = 24\pi G \rho t^2, \quad r \sim t^{1/3}. \quad (9)$$

Считается, что нам видна лишь часть Вселенной. В принципе световые лучи, приходящие к нам нерассеянными из самых дальних уголков «видимой Вселенной», должны были бы приносить ее изображение, соответствующее очень раннему возрасту. На практике же увидеть эту очень

юнюю Вселенную не так-то просто. Далекие галактики видны нам очень неясно, и свет их сильно смещен в красную область спектра. Даже исключительно яркие квазары перестают быть наблюдаемыми, когда длина волны их излучения утроится из-за красного смещения.

По мере старения Вселенной свету удается распространяться все дальше, и радиус видимой Вселенной увеличивается быстрее, чем разбегается вещество на ее границах, так что нам становится видно все больше материи. Если бы для Вселенной имело место неравенство $v_0^2 < 0$, то в конце концов в момент окончательного «схлопывания» Вселенной ее можно было бы увидеть целиком, однако и здесь полная наблюдаемая масса была бы конечной, ибо вселенные этого типа являются замкнутыми в пространстве и имеют конечный объем.

В нашей собственной Вселенной полно удивительных загадок. По мере того как она стареет, все бо́льшая и бо́льшая ее часть становится видимой, но сколько бы нового вещества ни оказалось в нашем поле зрения, оно все время будет распределено изотропно, а его плотность и распределение скоростей будут именно такими, какие следовало ожидать для равноправной части однородной Вселенной. Как же могла установиться эта однородность, если первые контакты между равными частями Вселенной впервые возникли спустя долгое время после начала расширения? Мизнер предполагает, что Вселенная на самых ранних стадиях была в высшей степени беспорядочной и что благодаря этому беспорядку разные ее части взаимодействовали друг с другом, прежде чем беспорядок сменился упорядоченным движением. Есть и другая загадка. Постоянная в уравнении (4) очень мала — настолько мала, что при современном неудовлетворительном знании величины ρ мы не можем с уверенностью сказать, не равна ли она нулю. Однако первый член в правой части уравнения (4) ранее был намного больше, чем сейчас: по крайней мере в 10^3 раз, когда началось образование галактик, и по крайней мере в 10^{13} раз, когда в «огненном шаре» протекали ядерные реакции (если верно предположение об «огненном шаре», к которому я еще вернусь). Загадка здесь вот в чем: как мог первоначальный взрыв начаться с такой точностью и каким образом радиальная скорость

разбегания оказалась так тонко подобранной, что разные части Вселенной разлетелись, а скорость разбегания постепенно замедлялась?

Теоретически как будто нет фундаментальных причин для такого точного совпадения. Если бы «огненный шар»

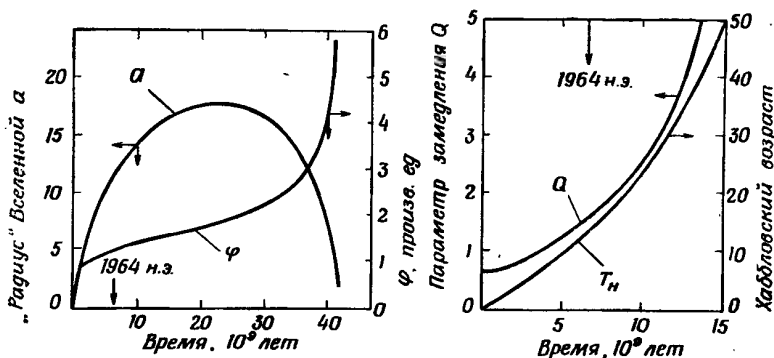


Рис. 27. Решение космологических уравнений для скалярного поля в замкнутом пространстве (кривизна положительна) при $\omega=3,0$. Современное значение хаббловского возраста $T_H=13 \cdot 10^9$ лет, а параметр замедления $Q=1,5$. На левом графике показана кривая, аналогичная кривой C рис. 26, но для гравитационной «постоянной», ведущей себя, как в скалярно-тензорной теории тяготения. Потенциал скалярного поля ϕ определяет силу гравитационного взаимодействия и обратно пропорционален величине гравитационной «постоянной». «Радиус» Вселенной и хаббловский возраст измеряются, как и время, в миллиардах лет.

расширялся всего на 0,1% быстрее, то теперешняя скорость разбегания была бы в $3 \cdot 10^3$ раз больше наблюдаемой; если бы первоначальная скорость была на 0,1% меньше, то Вселенная достигла бы лишь $3 \cdot 10^{-6}$ своего теперешнего радиуса, после чего начала бы сжиматься. При этом наибольшем значении радиуса плотность обычного вещества в ней была бы равна 10^{-12} г/см³, т. е. более чем в 10^{16} раз превышала бы наблюдаемую сейчас плотность. В такой Вселенной не могли бы образоваться звезды, так как она не просуществовала бы достаточно долго для формирования звезд.

Мы не будем здесь проводить строгий количественный анализ тех сложностей, которые привносит в космологию

скалярно-тензорная теория тяготения. Возможно, самым интересным в скалярно-тензорной космологии является монотонный рост скалярного поля со временем, обусловленный содержанием материи во Вселенной [8] (рис. 27). В случае холодной Вселенной (когда давление равно нулю) скорость возрастания скалярного поля равна

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{8\pi}{2\omega + 3} \rho t, \quad (10)$$

где ω — безразмерная постоянная ($\omega \approx 5$), уже обсуждавшаяся нами ранее. Чем выше плотность и чем больше возраст Вселенной, тем быстрее растет φ . Из уравнения (10) следует

$$\varphi = \frac{8\pi}{2\omega + 3} \langle \rho t \rangle t, \quad (11)$$

где угловые скобки означают среднее по времени от ρt . В этой теории локально измеренная величина гравитационной «постоянной» не постоянна, а определяется потенциалом φ и равна

$$G = \frac{2\omega + 4}{\varphi (2\omega + 3)}. \quad (12)$$

Следует заметить, что чем выше плотность и чем больше возраст Вселенной, тем меньше значение соответствующей им гравитационной «постоянной». Согласно этой теории, гравитационные силы так слабы по сравнению с электромагнитными лишь потому, что видимая часть Вселенной содержит так много материи. Отношение констант электрического и гравитационного взаимодействий для электрона равно

$$\frac{e^2}{Gm^2} = \frac{4\pi}{\omega + 2} \frac{c^2 \langle \rho t \rangle t r_0}{m} \sim \frac{M}{m} \frac{r_0}{r}, \quad (13)$$

где $r_0 = e^2/mc^2$ — классический радиус электрона, а M и R — масса и радиус видимой части Вселенной.

Если в скалярно-тензорной теории тяготения принять $\rho \approx 2 \cdot 10^{-29}$ г/см³ как критическую плотность, при которой $v_0^2 = 0$, то r и φ будут изменяться со временем как

$$r \sim t^{(2\omega + 2)/(3\omega + 4)},$$

$$\varphi \sim t^{2/(3\omega + 4)}. \quad (14)$$

Принимая $\omega \approx 5$, из уравнения (14) найдем, что относительное ослабление гравитационного взаимодействия составит $\sim 10^{-11}$ в год.

Роль прошлой истории видимой части Вселенной в определении современного значения гравитационной «постоянной» важна для принципа Маха [9]. Этот принцип состоит в несколько нечеткой идее о связи локально наблюдаемых инерциальных эффектов и далекой материи. В скалярно-тензорной теории тяготения картина такова: чем выше содержание материи во Вселенной и чем ближе эта материя расположена к пробному телу, тем сильнее будут силы инерции по сравнению с силами тяготения, т. е. тем слабее будет гравитационное взаимодействие.

Говоря в рамках скалярно-тензорной теории тяготения о раннем этапе расширения Вселенной, следует иметь в виду два разных эффекта. Во-первых, большая величина гравитационной «постоянной» на более раннем этапе усиливает замедление расширения. Во-вторых, скорость расширения зависит от возможного большого вклада скалярного поля в плотность энергий (см. уравнение (4)) [10]. Позднее я снова вернусь к этим вопросам.

КОСМИЧЕСКИЙ «ОГНЕННЫЙ ШАР»

Мысль о том, что Вселенная при своем возникновении была горячей и что в пространстве первоначально преобладало излучение, отнюдь не нова. Фундамент такой космологии был заложен еще в 1934 г. [11], однако первый серьезный вывод физических следствий из предположения о горячем начале Вселенной был сделан лишь Гамовым и его учеником Альфером [12]. Толчком для этой работы послужила мысль Гамова о том, что тяжелые элементы могли образоваться при ядерных реакциях молодой горячей Вселенной. Затем последовал целый ряд работ, но в конце концов выяснилось, что такой механизм не мог привести к возникновению значительного количества тяжелых элементов [13]. После этого «горячая космология» оказалась в опале и почти сошла со сцены, но позднее была возвра-

щена к жизни Хойлом и Тейлором, чтобы объяснить образование гелия [14].

Многие из нас, принстонцев, независимо выдвинули идею о горячем начале Вселенной [15], не будучи знакомы со статьей Хойла и Тейлора и не имея никакого представления об исследованиях, которым положил начало Гамов. Однако мы опирались на другие соображения — нам импонировала модель пульсирующей Вселенной, которая, по видимому, требовала горячего «запала». Чтобы в звездах населения II исключить тяжелые элементы, образовавшиеся в ходе предыдущего расширения Вселенной в прежних звездах, необходимы температуры выше 10^9 К, при которых ядра разбиваются на элементарные частицы. К тому же гравитационный коллапс нашей Вселенной с имеющимся в ней теперь излучением привел бы к адиабатическому сжатию этого излучения и к возникновению чрезвычайно горячего «огненного шара».

Предположение о такой горячей ранней стадии Вселенной — стадии горячего «огненного шара» — влечет за собой вывод о существовании в наши дни реликтового теплового (чернотельного) излучения, и члены нашей исследовательской группы Ролл и Уилкинсон приступили к постройке установки для обнаружения этого излучения. Еще до того, как эта установка была испытана, нам позволил Пензиас и сообщил о том, что он и Вилсон зарегистрировали неподдающиеся объяснению шумы [16]. Теперь мы считаем, что шум этот вызван тепловым излучением, поступающим на антенну [15]. Мысль о существовании космического теплового излучения была высказана ранее Гамовым, а Альфер и Герман [19] довольно точно оценили его теперешнюю температуру.

После первых измерений Ролла и Уилкинсона [17], результаты которых подтверждали истолкование этого излучения как теплового, различные группы предприняли целый ряд наблюдений. Так было определено теперешнее значение температуры этого излучения, равное 2,7 К [18]. Недавно поднятая на ракете установка зарегистрировала в диапазоне субмиллиметровых волн поток излучения, как будто не согласующийся с прежним температурным спектром [18а]. Возможно, что этот поток идет от источника, расположенного в нашей Галактике.

По иронии судьбы из-за теоретических трудностей первоначальная интерпретация наших наблюдений теплового космического излучения сейчас представляется сомнительной. Уже давно стало известно, что при интегрировании космологических уравнений не удастся пройти за стадию коллапса Вселенной и показать, что возникает обратный толчок, приводящий к новому ее расширению. Дело в том, что в математическом решении возникает сингулярность. Думали, что эта сингулярность обусловлена чрезмерно идеализированными физическими предположения-



Р и с. 28. Первый микроволновый радиометр, построенный в 1945 г. В этом же году было найдено, что верхний предел температуры теплового космического излучения равен 20 К, причем отклонение от изотропии не превышает 1 К.

ми об однородности и изотропности Вселенной, и надеялись, что эта сингулярность исчезнет, если ввести в математическую модель достаточно нерегулярностей [20]. Этого, однако, не произошло и сингулярность представляется неизбежной в рамках используемой теории [21].

Источником трудностей может быть как сама теория, так и то, что физическое время может оказаться не беспределельным. Точно решить нельзя, но некоторые считают, что возникновение сингулярности скорее математическая проблема, чем физическая, т. е. что она возникает в нашей

математической модели из-за какого-то несовершенства теории.

В деятельности принстонской группы по обнаружению и исследованию теплового космического излучения был курьезный случай. В основе установки, собранной Роллом и Уилкинсоном, лежит микроволновый радиометр, разработанный мною в годы второй мировой войны [22] (рис. 28). Прежний радиометр использовался для измерения поглощения сантиметровых волн парами воды в атмосфере [23]. По ходу этих измерений я получил в качестве верхнего предела температуры излучения, «приходящего от космической материи» на волне 1,25 см, значение 20 К [23]. Хотя обработку результатов и формулировку этих выводов я делал сам, все это было мною начисто забыто.

Пиблс случайно нашел этот старый результат, и потом я вспомнил, что в том же 1945 г. мы измерили и верхний предел анизотропии излучения этого типа — он оказался равен 1 К. (Этот результат не был тогда опубликован.)

Я должен подчеркнуть, что, когда в 1945 г. производились эти измерения, мы и не думали о «горячей космологии», а видели в этом излучении суммарный поток от далеких галактик.

Статья Гамова 1946 г. [12] была напечатана в «Physical Review» всего через 232 страницы после нашей [23], но между ними не было никакой взаимосвязи. Хотя полученный нами предел в 20 К был грубым, уже такой результат был бы полезен, так как он показывал, что плотность энергии теплового излучения недостаточно высока для того, чтобы остановить расширение Вселенной.

На рис. 29 и 30 показаны первоначальный вариант радиометра Ролла — Уилкинсона и новые принстонские прецизионные радиометры. На рис. 31 приведен график, изображающий наряду с другими результаты измерения космического теплового излучения тремя самыми прецизионными радиометрами [24].

Для космологии особенно важен вопрос об изотропности теплового излучения; он интенсивно исследовался Партриджем и Уилкинсоном [25] (рис. 32). Точность их результатов на два порядка превышает точность моих измерений, сделанных в 1945 г., и эти новые результаты



Рис. 29. Первоначальный вариант радиометра Ролла — Уилкинсона, смонтированный на крыше биологического факультета в Принстоне.



Рис. 30. Три прецизионных принстонских радиометра, работающих на волнах 3,2, 1,58 и 0,856 см. Они установлены на высоте 3800 м над уровнем моря на базе Баркрофта (Исследовательская станция Уайт-Маунтинс, Бишоп, Калифорния).

свидетельствуют, что космическое тепловое излучение изотропно с точностью, превышающей 10^{-2} К [25]. Из этих измерений изотропности теплового излучения следует, что верхний предел скорости движения Земли относительно него равен примерно 300 км/с [25].

Из общей теории «огненного шара» вытекает, что температура излучения падает со временем, изменяясь обрат-

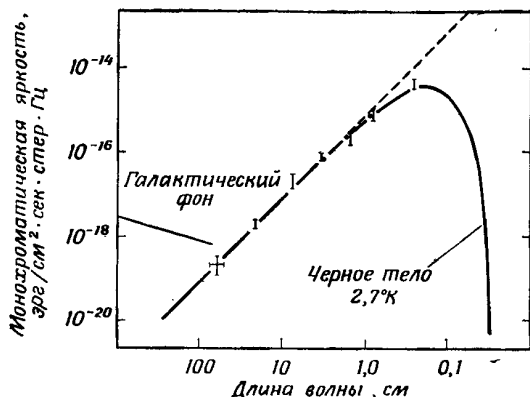


Рис. 31. Теоретический спектр теплового излучения черного тела при температуре 2,7 К и данные измерений (три прецизионных результата изображены точками, так как соответствующие погрешности слишком малы, чтобы их можно было показать на графике).

но пропорционально радиусу Вселенной. Многие физики видят в этом парадокс — ведь отсюда следует, что при постоянстве числа фотонов во Вселенной энергия каждого фотона убывает со временем, будучи обратно пропорциональной радиусу Вселенной. Кажется невероятным, что свободно распространяющиеся и невзаимодействующие фотоны теряют энергию. Такую потерю энергии можно объяснить двумя причинами.

1. Наблюдаемые нами теперь фотоны были испущены в молодой Вселенной очень давно веществом, быстро движущимся прочь от нас. Такое быстрое движение давало эффект Доплера — сдвиг в красную сторону. Это красное смещение тем сильнее, чем старше Вселенная, так как с

увеличением ее возраста место возникновения фотонов отодвигается от нас, а скорость разбегания вещества тем больше, чем больше это расстояние.

2. Вселенная однородна, а значит, симметрична, и проведенная через нее воображаемая плоскость делит ее на две одинаковые половины. С обеих сторон на такую пло-



Р и с. 32. Сконструированный Партриджем и Уилкинсоном принстонский радиометр для проверки изотропности излучения. Эта установка действовала в течение года в одном из наименее привлекательных мест земного шара — в пустыне Юма в Аризоне.

скость падают одинаковые потоки теплового излучения. Можно сказать, что плоскость в некотором роде подобна идеально отражающему зеркалу — в том смысле, что падающий и «отраженный» потоки равны друг другу. Построим воображаемый ящик из таких воображаемых «идеально отражающих» стенок. При расширении Вселенной увеличивает свой объем и ящик, так что энергия теплового излучения внутри него падает вследствие «работы», совершаемой давлением излучения на «стенки». Можно сказать

еще, что стоячие волны в таком ящике растягиваются при его расширении, так что длина волны должна расти пропорционально радиусу Вселенной.

Можно в общих чертах обрисовать превращение космического «огненного шара» в окружающую нас теперь Вселенную [15]. Хотя это описание базируется на прочном теоретическом фундаменте, следует иметь в виду, что наблюдательная база весьма скудна, и вся картина может оказаться ложной.

Мы начнем описание с момента, когда космический «огненный шар» имел температуру 10^{10} К. Все атомные ядра при таких условиях были расщеплены на элементарные частицы, и протоны и нейтроны присутствовали примерно в равных количествах. Имелись также электроны, позитроны и фотоны в количествах, примерно в 10^8 раз превышающих число протонов и нейтронов.

По мере расширения Вселенной температура падала, и через 180 с, когда радиус Вселенной возрос в 10 раз, она понизилась до 10^9 К, так что протоны и нейтроны могли начать объединяться в дейтроны без риска немедленного термического расщепления. После образования дейтронов смогли протекать и другие ядерные реакции, приводящие к образованию гелия [26]. К вопросу о возможном образовании гелия мы еще вернемся.

При температуре около 10^9 К по чистой случайности возможно протекание еще одного важного процесса: огромное число позитронов аннигилирует с электронами и дает фотоны. В результате число фотонов увеличивается приблизительно вдвое.

После этого Вселенная, уже содержащая ионизованный водород и, возможно, гелий, продолжала расширяться. Когда она расширилась еще в $2,5 \cdot 10^5$ раз, температура упала до $4 \cdot 10^3$ К (это случилось через $1 \cdot 10^5$ лет после начала расширения), и в ионизованной плазме электроны начали присоединяться к ядрам, образуя нейтральный газ. Теперь вступает в игру новое обстоятельство: начинают быстро увеличиваться первоначально малые неоднородности плотности газа в пространстве [27]. В результате газ разделился на отдельные облака. Можно ожидать, что размеры этих облаков были практически одинаковыми, а разброс их масс небольшим. Характерная масса облака за-

висит от теперешней плотности материи во Вселенной, которую мы знаем недостаточно хорошо, а также от того, какая теория тяготения верна, но эта масса не зависит от начальных неоднородностей плотности, если они были разбросаны беспорядочно и были очень малы, причем ти-

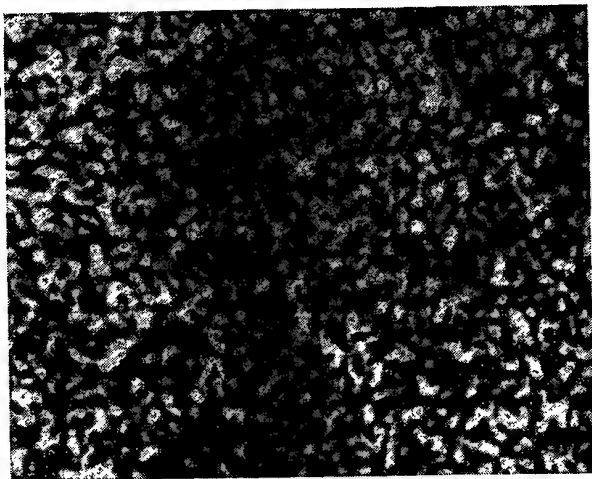


Рис. 33. Теоретически вычисленная картина распределения плотности в остывающем «огненном шаре» к началу образования газовых облаков. Мы полагаем, что шаровые звездные скопления — это результат дробления на звезды облаков такого типа.

пичный элемент объема содержал менее 10^4 масс Солнца (рис. 33).

В ходе дальнейшего расширения Вселенной размеры этих облаков не менялись, но сами облака разбегались во все стороны. В конце концов вследствие их беспорядочного расположения облака собрались в группу по 10^2 — 10^6 штук, связанные гравитационным взаимодействием. Эти группы прекратили расширение и начали сжиматься, что произошло примерно через 200 миллионов лет после стадии «огненного шара».

До катастрофического столкновения облаков друг с другом в некоторых из них газ превратился в звезды; по-

лагают, что так образовались шаровые звездные скопления [28]. Столкновение оставшихся облаков положило начало образованию других звезд, и считается, что большая часть оставшегося газа тогда-то и превратилась в звезды населения II. Полагают, что скорости, с которыми продолжают сейчас двигаться в пространстве эти звезды, соответствуют распределению скоростей в газовых облаках во времена образования звезд.

Первичные газовые облака могли обладать лишь небольшим моментом количества движения, так как ионизованное вещество космического «огненного шара» обладало значительной вязкостью, и любая турбулентность, которую можно было бы задать в качестве начального условия, должна была быстро затухнуть [28].

Наблюдаемые характеристики шаровых звездных скоплений удивительно похожи на вычисленные характеристики газовых облаков. Бросается в глаза сферичность скоплений, свидетельствующая о малости момента количества движения. Светимости скоплений и, вероятно, их массы различаются самое большее раза в три. Эти светимости, в сущности, не зависят от расположения скоплений и, по-видимому, одинаковы даже для скоплений, принадлежащих разным галактикам. Шаровые скопления мало различаются также по размерам и по форме.

Кратко резюмируя, можно сказать, что Вселенная (в той мере, как мы ее знаем) должна была образоваться из очень горячего космического «огненного шара», остывавшего по мере своего расширения. При температуре 10^9 К мог образоваться гелий, а при $4 \cdot 10^3$ К электроны и ядра плазмы рекомбинировали в нейтральный газ.

Этот газ собрался в облака, связанные гравитационным взаимодействием, группы которых в конце концов образовали галактики. Мы полагаем, что шаровые звездные скопления представляют собой реликтовые остатки первоначальных газовых облаков.

КОСМИЧЕСКИЙ «ОГНЕННЫЙ ШАР» И СКАЛЯРНО-ТЕНЗОРНАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

Наши знания об истории космического «огненного шара» скудны, а без них сейчас невозможно надежно проконтролировать теорию тяготения. Неточность данных

наблюдений частично компенсируется большой величиной релятивистских эффектов, предсказываемых скалярно-тензорной теорией тяготения для стадии космического «огненного шара»; однако совсем другое дело — надежность истолкования некоторых наблюдений. Поскольку пока нельзя сделать окончательных заключений, мы рассмотрим здесь выводы, следующие из скалярно-тензорной теории в применении к космическому «огненному шару», чтобы в будущем облегчить понимание наблюдательных данных.

Мы уже отмечали, что на теперешней стадии влияние скалярного поля Вселенной незначительно. Относительная скорость уменьшения гравитационной «постоянной», связанная со скалярным полем, имеет порядок 10^{-11} в год, что не может привести ни к каким заметным эффектам.

Скалярно-тензорная теория тяготения была применена к теории космического «огненного шара» [29]. В прошлом величина гравитационной «постоянной» могла по крайней мере в 5 раз превышать современную в случае пространственно замкнутой Вселенной (т. е. если современная средняя плотность во Вселенной равна $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³). Если основная часть энергии Вселенной на этом раннем этапе принадлежала скалярному полю, то гравитационная «постоянная» могла бы иметь тогда величину в 10^5 больше современной, а плотность энергии скалярного поля в 10^8 раз превышала бы плотность энергии излучения «огненного шара» (рис. 34).

Как было замечено выше, данные о современной средней плотности весьма сомнительны. Если она равна всего лишь $7 \cdot 10^{-31}$ г/см³, то это дает для нижнего предела гравитационной «постоянной» на этапе образования гелия значение, в 2 раза превышающее современное, но оно опять-таки могло быть и много больше.

Мы сосредоточим внимание в основном на двух аспектах эволюции «огненного шара». Если считать правильной всю обрисованную схему в целом, то от конкретного выбора используемой теории тяготения будет существенно зависеть как образование гелия [29], так и образование шаровых скоплений [28].

Рассмотрим сначала проблему образования гелия [26]. При температурах, достигающих 10^{10} К, количество про-

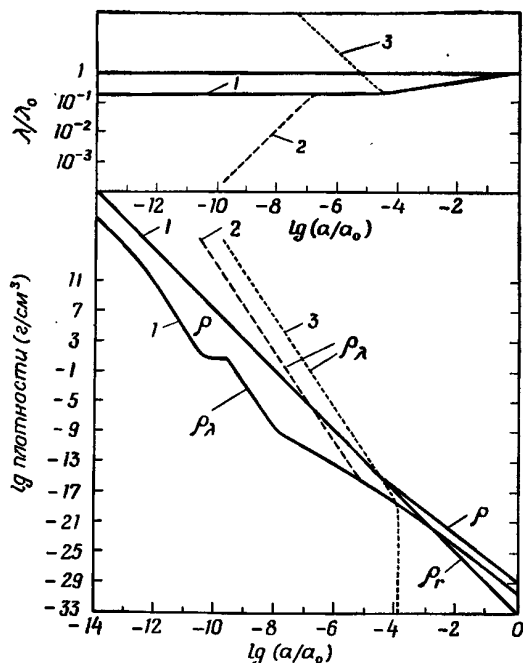


Рис. 34. Ход эволюции горячей Вселенной, рассчитанный по скалярно-тензорной теории тяготения для хаббловского возраста 10^{10} лет, современной плотности материи $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³ и современной температуры теплового излучения 3 К. Здесь ρ — суммарная плотность вещества и излучения (в г/см³), а ρ_r и ρ_λ относятся соответственно к полю излучения и к скалярному полю. Решение 1 описывает тот случай, когда Вселенная начинает расширяться при наименьшей возможной энергии скалярного поля. В решении 2 на ранней стадии эволюции Вселенной преобладает энергия скалярного поля. Решение 3 не имеет физического смысла.

тонов и нейтронов должно быть одинаковым. Обычного радиоактивного распада нейтронов на протоны и электроны при этом не происходит, так как он компенсируется равным числом обратных реакций при столкновениях электронов высоких энергий с протонами в горячей плазме. Когда температура плазмы опустилась до 10^9 К, условия температурного равновесия существенно изменились

в пользу протонного состояния, однако температура упала так быстро, что равновесие не успело установиться. У нейтронов не хватило времени, чтобы превратиться в протоны, так что могло сохраниться достаточно нейтронов, из которых образовалось некоторое количество гелия. Если

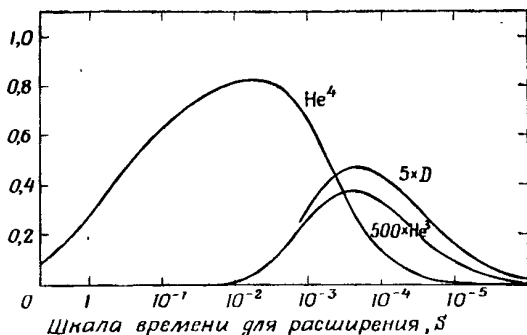


Рис. 35. Влияние скорости расширения на образование He, D и He^3 в космическом «огненном шаре» (по Пиблсу). Значение $S=1$ соответствует общей теории относительности. Чем меньше величина S , тем быстрее идет расширение. В скалярно-тензорной теории тяготения для современной плотности материи $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³, температуре теплового излучения 3 К и хаббловском возрасте 10^{10} лет получается $S < 0,45$.

верна общая теория относительности и рассмотренная космологическая модель, то 25—28% газа пошло бы на образование гелия.

Ожидаемый выход гелия сильно зависит от скорости изменения температуры, а значит, и от скорости расширения Вселенной [30]. При ускорении расширения Вселенной у нейтронов остается меньше времени для распада, т. е. для образования гелия их останется больше. Однако слишком быстрое расширение приводит к тому, что не хватит времени для протекания ядерных реакций. На рис. 35, заимствованном из статьи Пиблса [30], изображена зависимость выхода гелия от скорости расширения Вселенной. Если скорость расширения возрастает в 100 раз,

то на образование гелия пойдет 80% вещества, но при возрастании скорости расширения в 10^5 раз количество гелия сводится практически к нулю.

Скорость расширения изменяется как $\sqrt{G\rho}$ (см. уравнение (4), памятуя, что величиной v_0^2 можно пренебречь). Если теперешнюю среднюю плотность принять равной $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³, то скалярно-тензорная теория тяготения даст скорость расширения, по крайней мере в 2,3 раза большую, чем общая теория относительности (но может получиться и в $3 \cdot 10^6$ раз большая скорость). В первом случае ожидаемый выход гелия составит 42%; тогда как во втором случае при чрезвычайно быстром расширении получим 0% [29]. Если же теперешняя средняя плотность равна всего лишь $7 \cdot 10^{-31}$ г/см³, соответствующие значения для выхода гелия будут равны 32% и 0% [29].

Нам неизвестно никаких естественно протекающих процессов в Галактике, при которых большие количества гелия могли бы расщепляться на водород, тогда как известно, что в звездах водород «сгорает» и образуется гелий (это их главный источник энергии). Поэтому ожидается такое же наблюдаемое отношение количеств гелия и водорода, какое дает космический «огненный шар», или больше. Солнце содержит сейчас, по-видимому, менее 30% гелия вблизи своей поверхности, так что найденное выше значение 42% чрезмерно велико. По-видимому, единственная возможность, не противоречащая наблюдениям в случае Вселенной с высокой плотностью, состоит в том, что в «огненном шаре» гелий вообще не образовывался. Хотя на рис. 35 показано, что при $S \approx 3 \cdot 10^{-4}$ выход гелия может составлять 20—30%, этот вариант можно исключить, так как при этом слишком велик выход дейтерия, чего на самом деле не наблюдается.

На величину выхода гелия в космическом «огненном шаре» может влиять не только участие в гравитационном взаимодействии скалярного поля. Неоднородность и анизотропность материи в «огненном шаре» также ускоряли бы расширение, хотя неправдоподобно, чтобы при этом скорость могла возрасти в 10^5 раз, что нужно для прекращения образования гелия. Чрезвычайное преобладание нейтрино над антинейтрино также могло бы повлиять на образование гелия [15, 26], но для этого требуется неправ-

доподобно большой избыток первых (примерно в 10^7 раз больше количества протонов).

Спектроскопические наблюдения свидетельствуют о том, что приблизительно $1/4$ всего межзвездного газа (по массе) составляет гелий, но трудно решить, образовался ли этот гелий в космическом «огненном шаре» или много позднее — вместе с прочими элементами, присутствующими в звездах населения II.

Первичный гелий следовало бы искать в наружных слоях звезд населения II, но эти звезды, принадлежащие

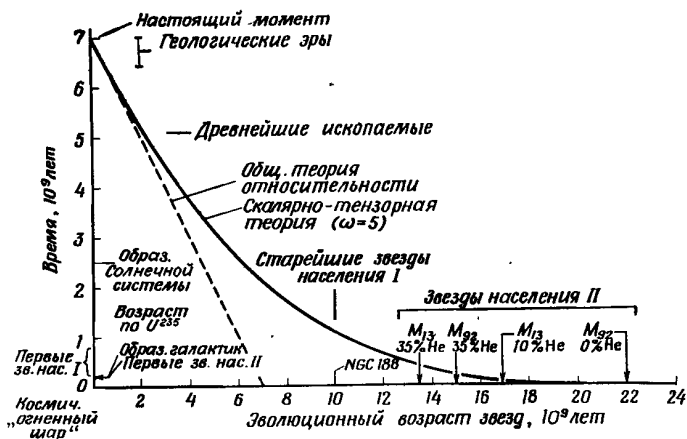


Рис. 36. По оси абсцисс отложены эволюционные возрасты звезд, вычисленные в предположении правильности общей теории относительности.

к главной последовательности, слишком холодны и температуры в их атмосферах недостаточны, чтобы возбуждать линии спектра гелия. Что же касается немногих относящихся к населению II горячих звезд, то все они зашли далеко в своей эволюции, и их внешние слои, вероятно, обогащены гелием, образовавшимся при выгорании водорода в их недрах.

Любопытно, что у этих горячих голубых звезд обнаружены лишь очень слабые линии гелия; однако не ясно, как это следует истолковать, потому что слабые линии

наблюдаются иногда и у голубых звезд населения I, относительно которых известно, что гелия в них много.

Другой возможный способ определить содержание гелия в звездах населения II опирается на соотношение между массой, средним молекулярным весом и светимостью звезды. Теоретически светимость звезды сильно зависит от среднего молекулярного веса ее вещества и приблизительно пропорциональна его седьмой степени. Если известны как масса, так и светимость, то можно определить средний молекулярный вес звезды, а тем самым и содержание в ней гелия. К сожалению, примерно из дюжины звезд, массы которых надежно измерены, ни одна не относится к населению II.

Вопрос о содержании гелия очень серьезен, так как при вычислении возраста этих наиболее старых звезд получаются различные (почти на 50%) результаты, в зависимости от того, какое содержание гелия в них мы примем. Посмотрите на рис. 36, но помните, что приводимые в более поздних публикациях возрасты на несколько миллиардов лет меньше, чем на этом рисунке. Эволюционные возрасты звезд, вычисленные и отложенные по оси абсцисс на рис. 36, — это возрасты, вычисленные в предположении, что гравитационная «постоянная» не изменяется. Согласно скалярно-тензорной теории тяготения, светимость в прошлом была выше, так как она изменяется приблизительно пропорционально седьмой степени гравитационной «постоянной». Поэтому-то в этой теории получаются меньшие возрасты [32]. Сплошной линией на рис. 36 изображена связь между эволюционным возрастом, рассчитанным согласно общей теории относительности, и моментом возникновения, полученным из скалярно-тензорной теории тяготения, если принять хаббловский возраст Вселенной 10^{10} лет и теперешнюю среднюю плотность $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³.

Следовало бы отметить, что для эволюционного возраста звезд населения II скалярно-тензорная теория тяготения дает $15 \cdot 10^9$ лет (или $2 \cdot 10^{10}$ лет, если за хаббловский возраст принять $13 \cdot 10^9$ лет). Для эволюционного возраста $2 \cdot 10^{10}$ лет требовалось бы, по-видимому, очень низкое содержание гелия, согласующееся с предсказаниями скалярно-тензорной теории тяготения. Однако общая теория относительности дает 27% содержания гелия и меньший

возраст — возможно, только 10^{10} лет, что согласуется с хаббловским возрастом $15 \cdot 10^9$ лет. Обе трактовки достаточно хорошо согласуются с теперешней скоростью расширения Вселенной [5] (которой соответствует хаббловский возраст) и с возрастом Галактики, определенным по радиоактивному распаду урана [4].

При падении температуры «огненного шара» до 4000 К, когда плазма начинает рекомбинировать и появляются облака газа, гравитационная «постоянная» в скалярно-тензорной теории тяготения в 3,4 раза превышала ее теперешнее значение, если принять теперешнюю плотность $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³ и хаббловский возраст 10^{10} лет (при $\omega=5$). Если теперешняя плотность равна $7 \cdot 10^{-31}$ г/см³, то гравитационная «постоянная» окажется в 1,75 раза больше. Массы образующихся из газа облаков зависят от величины гравитационной «постоянной» в момент образования, а также от средней плотности Вселенной.

Средние размеры таких облаков — зародышей скоплений — определяются джинсовской длиной [27, 28]

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi k T}{G \rho m}}, \quad (15)$$

где m — масса атома водорода, $T=4000$ К — температура газа, ρ — плотность газа при этой температуре. Средняя масса облака приблизительно равна

$$\rho \lambda = \rho^{-1/2} \left(\frac{\pi k T}{G m} \right)^{3/2}.$$

Для двух значений теперешней средней плотности, рассматриваемых нами ($2 \cdot 10^{-29}$ и $7 \cdot 10^{-31}$ г/см³), в общей теории относительности получаются ожидаемые значения масс шаровых скоплений $6 \cdot 10^5$ и $3 \cdot 10^6$ солнечных масс. В скалярно-тензорной теории тяготения эти массы оказываются равны $1 \cdot 10^5$ и $1,5 \cdot 10^6$ солнечных масс соответственно.

Если допустить, что мы правильно описали возникновение шаровых звездных скоплений и что эти последние не испытали существенных потерь массы, наблюдаемые значения масс скоплений могут оказаться полезными при определении теперешней плотности материи во Вселен-

ной, а может быть, и при выборе между разными теориями тяготения.

Однако это слишком оптимистический взгляд на вещи. Многие астрономы сомневаются в этой теории шаровых звездных скоплений и в возможности «испарения» звезд из шаровых скоплений. Более того, нам известны массы всего лишь двух шаровых звездных скоплений, равные приблизительно $1,4 \cdot 10^5$ и $2,5 \cdot 10^5$ солнечных масс. Хотя эти значения масс как будто говорят в пользу большей плотности массы во Вселенной и в пользу скалярно-тензорной теории тяготения, такое истолкование их крайне ненадежно.

В заключение можно сказать, что выводы из скалярно-тензорной теории тяготения существенны главным образом для раннего этапа развития Вселенной. Мы отметили, что ожидаемый выход гелия в космическом «огненном шаре» сильно зависит от того, какая теория тяготения верна. Выбор теории сильно сказывается и на величине ожидаемой средней массы шарового звездного скопления. Если справедлива скалярно-тензорная теория тяготения и если теперешняя средняя плотность достигает $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³, то эффект, которого, скорее всего, следует ожидать в ближайших наблюдениях, — это низкое содержание гелия в звездах населения II. Однако и этот вывод не может быть окончательным и решающим.

Если бы оказались и другие доводы в пользу скалярно-тензорной теории тяготения, она послужила бы чрезвычайно ценным ключом к истолкованию наблюдений космического «огненного шара», но я сомневаюсь, чтобы эти наблюдения могли когда-нибудь дать нам решающий довод, подтверждающий или опровергающий скалярно-тензорную теорию.

ЛИТЕРАТУРА К ТРЕТЬЕЙ ЛЕКЦИИ

1. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, Rev. Mod. Phys., 29, 547 (1957).
2. M. Schwarzschild, Structure and Evolution of the Stars, Princeton University Press, 1958. (Русский перевод: М. Шварцшильд, Строение и эволюция звезд, ИЛ, М., 1961.)
3. I. Iben, J. Faulkner, Astrophys. Journ., 153, 101 (1968).

4. R. H. Dicke, *Astrophys. Journ.*, **155**, 123 (1968).
5. A. Sandage, *Astrophys. Journ.*, **152**, L149 (1968).
6. E. P. Hubble, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **15**, 168 (1929).
7. W. H. McCrea, E. A. Milne, *Quart. Journ. Math.*, **5**, 73 (1934);
C. Callan, R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, *Amer. Journ. Phys.*, **33**, 105 (1965).
8. C. Brans, R. H. Dicke, *Phys. Rev.*, **124**, 925 (1961).
9. E. Mach, *Science of Mechanics*, 1883; Open Court Publ. Co., Chicago, 1902, Chapt. 2, Sec. 6.
10. R. H. Dicke, *Astrophys. Journ.*, **152**, 1 (1968).
11. R. C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Oxford University Press, 1934.
12. G. Gamow, *Phys. Rev.*, **70**, 572 (1946);
R. A. Alpher, *Phys. Rev.*, **74**, 1577 (1948).
13. G. Gamow, *Phys. Rev.*, **74**, 505 (1956);
R. A. Alpher, H. A. Bethe, G. Gamow, *Phys. Rev.*, **73**, 803 (1948);
R. A. Alpher, J. W. Follin, R. C. Herman, *Phys. Rev.*, **92**, 1347 (1953);
R. A. Alpher, R. C. Herman, *Rev. Mod. Phys.*, **22**, 153 (1950);
E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.*, **29**, 547 (1957).
14. F. Hoyle, R. J. Tayler, *Nature*, **203**, 1108 (1964).
15. R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll, D. T. Wilkinson, *Astrophys. Journ.*, **142**, 414 (1965).
16. A. A. Penzias, R. W. Wilson, *Astrophys. Journ.*, **142**, 419 (1965).
17. P. G. Roll, D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Letters*, **16**, 405 (1966); *Ann. of Phys.*, **44**, 289 (1967).
18. T. F. Howell, J. R. Shakeshaft, *Nature*, **216**, 753 (1967);
W. J. Welch et al., *Phys. Rev. Letters*, **18**, 1068 (1967);
M. S. Ewing, B. F. Burke, D. H. Staelin, *Phys. Rev. Letters*, **19**, 1251 (1967);
D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Letters*, **19**, 1195 (1967);
R. A. Stokes, R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Letters*, **19**, 1199 (1967);
P. E. Boynton, R. A. Stokes, D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Letters*, **21**, 462 (1968).
- 18a. K. Shivanadan, J. K. Houck, M. O. Harwit, *Phys. Rev. Letters*, **21**, 1460 (1968).
19. R. A. Alpher, R. C. Herman, *Nature*, **162**, 774 (1948).
20. Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников, *Успехи Физ. Наук*, **30**, 391 (1963).
21. S. W. Hawking, G. F. R. Ellis, *Astrophys. Journ.*, **152**, 25 (1968).
22. R. H. Dicke, *Rev. Sci. Instr.*, **17**, 268 (1946).
23. R. H. Dicke, R. Beringer, R. L. Kyle, A. B. Vane, *Phys. Rev.*, **70**, 340 (1946).

24. D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Letters, **19**, 1195 (1967);
R. A. Stokes, R. B. Partridge, D. T. Wilkinson,
Phys. Rev. Letters, **19**, 1199 (1967).
25. R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, Phys. Rev
Letters, **18**, 577 (1967); Nature, **215**, 719 (1967).
26. P. J. E. Peebles, Astrophys. Journ., **147**, 859 (1967).
R. V. Wagoner, W. A. Fowler, F. Hoyle, As
trophys. Journ., **148**, 3 (1967).
27. G. Gamow, Phys. Rev., **74**, 505 (1948);
P. J. E. Peebles, Astrophys Journ **142**, 1317 (1965).
147, 859 (1967).
28. P. J. E. Peebles, R. H. Dicke Astrophys Journ.
154, 891 (1968).
29. R. H. Dicke, Astrophys Journ., **152**, 1 (1968);
G. S. Greenstein, Astr. and Space Sci., **2**, 155 (1968).
30. P. J. E. Peebles, Astrophys. Journ., **146**, 542 (1966)
31. R. H. Dicke, Rev. Mod. Phys., **34**, 110 (1962);
R. H. Dicke, Stellar Evolution, R. F. Stein and A. G. W. Ca
meron, eds., N. Y. Plenum Press, 1966

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Н. В. Мицкевич.</i> Вселенная, гравитация и Роберт Дикке . .	5
<i>М. А. Померанц.</i> Вступление	10
Предисловие	13
I. Опыт Этвеша и гравитация	17
II. Сплюснутость Солнца и гравитация	44
III. Космический «огненный шар» и гравитация	68